

LA MESURE DE L'OXYGÈNE DISSOUS PAR SONDE POLAROGRAPHIQUE DITE SONDE DE CLARK

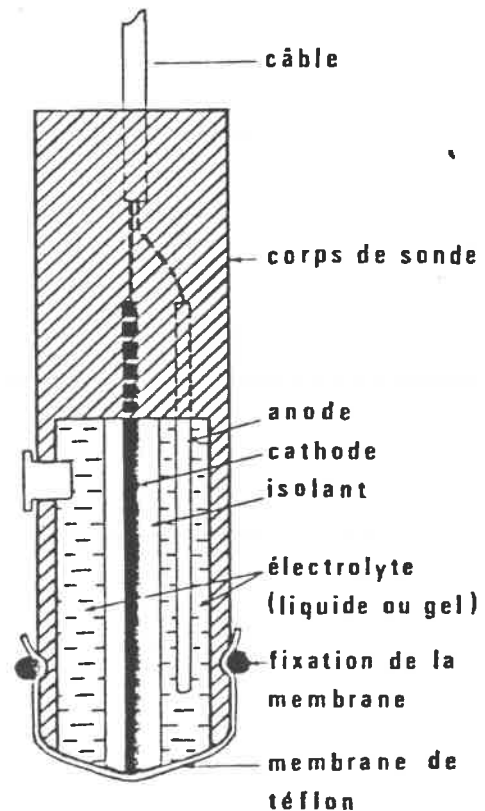


Fig. 1. — SONDE DE CLARK.
Schéma de principe.

PRINCIPE ET PRATIQUE A LA PORTEE DE TOUS

INTRODUCTION

L'oxygène dissous est le facteur principal de la vie aquatique. Il en est donc aussi le facteur limitant, plus que la température de l'eau ou le manque de substances nutritives.

La mesure de la teneur en oxygène dissous d'une eau permet d'apprécier l'activité biologique qui peut exister dans cette eau, ou au contraire son degré de pollution ; ou aussi une activité biologique excessive (eutrophisation ou surcharge piscicole par exemple).

Différentes méthodes de mesure de l'oxygène dissous existent :

- 1.1. méthode chimique : la méthode de Winkler, normalisée, sert de référence mais elle est délicate et malaisée sur le terrain.
- 1.2. méthode chromatographique : elle nécessite un matériel sophistiqué et coûteux, réservé aux mesures fines de laboratoire.

- 1.3. méthodes d'analyse électrochimique : différents types de sonde existent. Le plus répandu est celui des sondes polarographiques ou sondes de Clark. Le succès de ce type de sonde a deux raisons : ces sondes sont généralement de petite taille et très maniables ; l'appareil de contrôle qui leur est associé peut aussi être de taille réduite et sa consommation électrique est faible. Mais surtout l'étalonnage et la mesure sont simples et donc pratiques sur le terrain.

II. LA SONDE POLAROGRAPHIQUE OU SONDE DE CLARK

Inventée par Heyrovsky en 1920, elle fut appliquée à des mesures biologiques par Davies et Brink (1942) ; suivis par Kamienski (1949).

Ce n'est que dans les années 50 que CLARK la perfectionna définitivement et toutes les sondes polarographiques actuelles sont basées sur le même principe et ont la même conception de base.

2.1. Description de la sonde de Clark :

Schématiquement, deux électrodes métalliques baignent dans un électrolyte (solution aqueuse conductrice du courant électrique). La cathode est isolée de ce liquide par une gaine en verre ou en plastique. Le courant électrique ne peut ainsi passer que par l'extrémité de la cathode qui est au contact d'une membrane qui sépare l'électrolyte du milieu ambiant. Cette membrane généralement en téflon n'est perméable qu'aux gaz.

2.2. Fonctionnement de la sonde de Clark.

Lorsque l'on met la sonde sous tension électrique, c'est-à-dire lorsqu'on la branche sur l'appareil de mesure, le courant passe de l'anode à la cathode par l'électrolyte. Les réactions chimiques que produit le passage du courant dans l'électrolyte sont complexes. On peut les résumer de la manière suivante (sommaire, mais claire pour les non chimistes) : Le passage du courant décompose l'eau de l'électrolyte et l'hydrogène de cette décomposition (électrolyse) va former une couche gazeuse sur l'extrémité de la cathode. Cette couche d'hydrogène isole la cathode et plus aucun courant électrique ne passe. L'appareil indique zéro. Si le milieu dans lequel on plonge la sonde contient de l'oxygène, ce dernier traverse la membrane poreuse aux gaz. Il se combine alors à l'hydrogène de la cathode pour former de l'eau. La surface de la cathode est alors débarrassée de la couche d'hydrogène et le courant passe de nouveau. Le circuit est fermé et l'appareil indique une valeur différente de zéro. Comme la tension mesurée est proportionnelle à la quantité d'oxygène qui a traversé la membrane, on peut graduer l'appareil directement en milligramme d'oxygène au lieu de le graduer en millivolts.

III. EFFETS DE DIFFERENTS FACTEURS PHYSIQUES SUR LA MESURE DE L'OXYGENE DISSOUS :

3.1. Effet de la température sur la solubilité de l'oxygène dans l'eau.

La solubilité de l'oxygène dans l'eau diminue quand la température augmente.

Ce phénomène est d'ailleurs valable pour l'air : lorsque l'on chauffe l'eau, des bulles apparaissent sur les parois du récipient et lorsque l'on atteint 100 °C, l'eau bouillonne ; c'est l'air dissous qui s'échappe. Ce dégazage de l'eau évident à 100 °C existe aussi à 20 ou 30 °C, même s'il n'est pas visible. La courbe 1 de la figure 2 montre bien que la solubilité de l'oxygène diminue avec l'accroissement de température.

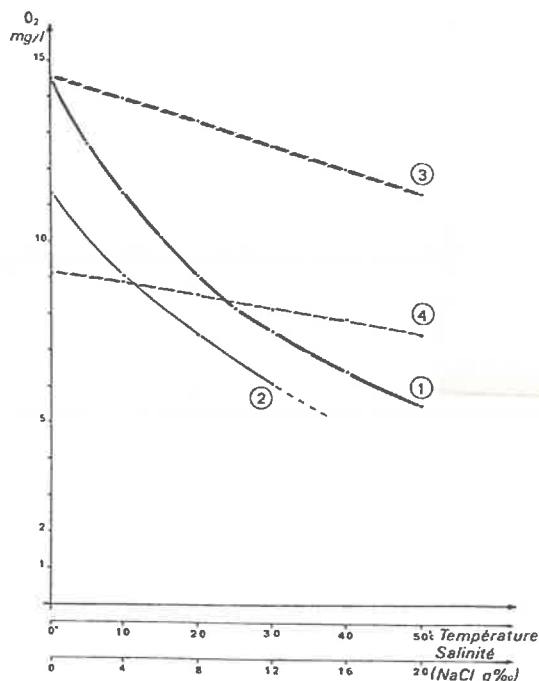


Fig. 2. — SOLUBILITE DE L'OXYGENE DANS L'EAU EN FONCTION DE LA TEMPERATURE ET DE LA SALINITE.

A pression normale (760 mm Hg) :

1. Solubilité de l'oxygène dans l'eau douce en fonction de la température.
2. Solubilité de l'oxygène dans l'eau salée (à 20 ‰ de NaCl) en fonction de la température.
3. Solubilité de l'oxygène en fonction de la salinité à 0 °C de température.
4. Solubilité de l'oxygène en fonction de la salinité à 20 °C de température.

3.2. Effet de la température sur la porosité de la membrane de téflon.

Le téflon en feuille très mince réagit fortement aux variations de température. Il se dilate ou se contracte selon que la température augmente ou diminue. Sa porosité varie de la même façon. Cette variation modifie la vitesse de passage de l'oxygène à travers la membrane et fausse la mesure. Sur la plupart des oxy-mètres actuels un dispositif électronique compense automatiquement cette variation de porosité. Cependant, comme la loi qui régit cette porosité peut varier quelque peu selon les membranes on a intérêt à étalonner la sonde à une température très proche de celle de l'eau que l'on veut contrôler.

3.3. Effets de la pression et notion de pression partielle.

L'air est essentiellement composé (en volume) : d'azote (79 %) et d'oxygène (21 %). La pression partielle de l'oxygène est donc de 21 % de la pression totale de mélange gazeux. Si l'on enferme de l'air dans une pompe à vélo, lorsque l'on appuie sur le piston, on augmente la pression sur l'air emprisonné. On augmente d'autant la pression partielle de l'oxygène mais la quantité d'oxygène est inchangée. Il se passe

la même chose dans la nature : mesurons l'oxygène dissous dans l'eau d'un étang. Supposons que cette eau est à 10 °C et saturée de façon homogène. La sonde indique dans l'air et aussi, juste sous la surface de l'eau, 11,26 mg d'oxygène.

Inversement, lorsque l'on fait des mesures dans des ruisseaux ou des lacs d'altitude, la pression atmosphérique est plus faible. La teneur en oxygène indiquée par la sonde est dans ce cas inférieure à la teneur réelle et il faut majorer la lecture.

Dans les deux cas, les constructeurs fournissent avec la notice de l'appareil les tables de correction de pression.

2.4 Effet de la salinité de l'eau sur la solubilité de l'oxygène.

Lorsque l'on fait une analyse Winkler sur de l'eau de mer saturée, on constate qu'elle contient moins d'oxygène dissous qu'une eau douce saturée à la même température. Sur la figure 2 on voit bien qu'à même température l'eau salée contient moins d'oxygène (courbe 2) que l'eau douce (courbe 1). Une concentration croissante de sel réduit la solubilité de l'oxygène comme l'illustrent les courbes 3 et 4 de la figure 2. Pour résumer les lois physico-chimiques qui régissent ce phénomène, on peut dire que le soluté NaCl chasse le soluté O₂ de leur solvant commun, l'eau.

Comme on étalonne généralement les sondes de Clark dans l'air ou dans l'eau douce saturée, on doit, comme pour la pression corriger la lecture faite en eau salée. Si l'on ne veut pas faire de calcul de correction, il faut étalonner les sondes directement dans l'eau salée saturée.

3.5. Effet de la vitesse de passage de l'eau devant la membrane.

Nous avons vu (par. 22) que la sonde consomme par combinaison chimique avec l'hydrogène de la cathode, l'oxygène qu'elle mesure. Si on met la sonde dans une eau saturée au repos, on voit décroître la valeur lue en quelques secondes. Cette valeur finit par se stabiliser bien en dessous de la teneur de saturation que l'appareil devrait afficher. Que s'est-il passé ? La sonde a consommé l'oxygène de l'eau qui est au contact de la membrane. La loi d'équilibre des gaz parfaits (loi de Henry) tend à transférer l'oxygène de l'eau environnante vers l'eau appauvrie par la sonde. (C'est aussi cette loi qui permet à l'eau de se saturer en oxygène au contact de l'air).

Mais la vitesse de transfert de l'oxygène dans l'eau est inférieure à la vitesse de diffusion de l'oxygène à travers la membrane. Ce retard explique que la sonde indique une valeur inférieure à la teneur

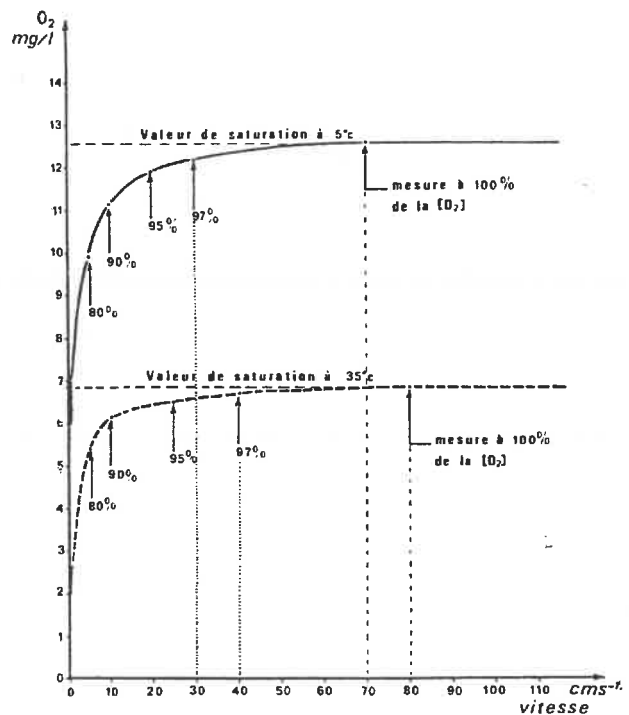


Fig. 3. — MESURE DE L'OXYGÈNE DISSOUS : influence de la vitesse d'écoulement de l'eau devant la membrane.

en O₂ de l'eau environnante. Pour compenser ce retard et afficher la teneur réelle en oxygène, il faut renouveler l'eau devant la membrane.

On peut :

- agiter la sonde dans l'eau (c'est la méthode la plus simple pour les mesures ponctuelles) ;
- placer la sonde là où l'eau coule assez rapidement (par exemple juste à l'amont d'un déversoir) ;
- si la vitesse de l'eau est insuffisante, on peut placer un système d'agitation autonome sur la sonde.

La figure 4 rend compte des nombreuses mesures simultanées vitesse-lecture d'oxygène qui ont été faites. On voit qu'indépendamment de la température de l'eau, la sonde de Clark indique pratiquement la teneur réelle (entre 97 et 100 %) dès que la vitesse de passage de l'eau devant la membrane dépasse 40 cm à la seconde. A 80 cm/s, la sonde indique 100 % de la teneur réelle. Il n'est pas recommandé d'agiter l'eau davantage, car on risque d'introduire de l'air et de fausser, cette fois par excès, la mesure.

IV. ETALONNAGES DES SONDES DE CLARK.

Les étalonnages ont deux buts :

- calibrer l'appareil pour faire les mesures,
- contrôler les défaillances et le vieillissement de la sonde. (Voir aussi chapitre VIII).

4.1. Mise en marche de l'appareil et de la sonde.

Lorsque l'on a un oxymètre à piles ou batteries, on s'assure d'abord que leur charge est suffisante (et éventuellement que leurs contacts ne sont pas oxydés ou souillés).

La sonde étant raccordée à l'appareil, on commute sur la position « mesure » ou « oxygène », ou encore « température » si la sonde est combinée oxygène-température. La sonde est ainsi mise sous tension.

On doit ensuite attendre plus ou moins longtemps que la sonde soit polarisée — c'est-à-dire que l'équilibre électro-chimique s'établisse et que l'hydrogène formé s'accumule sur la cathode. Selon le modèle et la marque choisis, le temps de polarisation varie de quelques dizaines de secondes à quelques dizaines de minutes. Il a aussi tendance à croître avec le vieillissement de la sonde.

4.2. Etalonnage du zéro chimique.

Il consiste à mettre la sonde dans une eau dépourvue d'oxygène dissous pour vérifier que la sonde fonctionne bien et pour caler le zéro de l'appareil. Mode opératoire : dans un volume d'eau propre (distillée, permutée, ou du robinet, mais non chlorée), suffisant pour immerger toute la partie fonctionnelle de la sonde, on met une petite quantité de sulfite de sodium bien sec (dans la proportion d'une cuillère à café rase pour un litre d'eau). Cette substance, si elle est conservée à l'abri de l'humidité est très avide d'oxygène. La solution ainsi préparée, lorsque la majeure partie du sulfite est dissoute après agitation, reste dépourvue d'oxygène au moins pendant une heure. Par commodité de langage, on l'appelle souvent « solution oxy-nul ».

On plonge alors la sonde dedans, de 5 à 30 minutes selon sa rapidité de réponse, avant de caler l'affichage de l'appareil sur le zéro. On rince ensuite la sonde.

3. Etalonnage à la saturation en oxygène.

C'est le plus important et le plus délicat : si la mesure en oxy-nul est indépendante des facteurs physiques (température, pression, etc.) il n'en est pas du tout de même de l'étalonnage à la saturation.

4.3.1. Méthode de base : étalonnage dans une eau saturée d'oxygène : il faut d'abord préparer un échantillon d'eau saturée :

On fait barbotter longuement (plus d'une demi-heure) de l'air sous pression dans de l'eau fraîchement distillée (seule eau dépourvue de bactéries, de sels minéraux réducteurs et de matière organique qui consomment de l'oxygène). Cette aération forcée sursature l'eau. Il faut la laisser au repos, à température constante pendant 24 heures. Cette eau en équi-

libre avec l'atmosphère est alors juste saturée en oxygène. Quand la sonde plongée dans cette eau s'est mise à sa température, on calibre l'appareil sur la valeur de la saturation en fonction de cette température de l'eau saturée. Les valeurs de saturation de l'eau en oxygène dissous en fonction de la température, ont été déterminées internationalement par l'UNESCO à la suite des travaux de Truesdale pour la pression atmosphérique normale (760 mm de mercure ou 1 013,25 millibars). Cette table a été reprise par la norme AFNOR n° T 90 106 de novembre 1973.

Souvent les chimistes font en même temps une analyse de Winkler pour contrôler l'état de saturation de l'eau d'étalonnage.

Notons que si cet étalonnage est fait à une température différente de celle des eaux que l'on veut ensuite contrôler, les mesures seront plus ou moins erronées (revoir § 32). De plus, comme cette méthode ne peut guère être utilisée sur le terrain, un changement de pression entre le lieu d'étalonnage et le lieu de contrôle fausse aussi les mesures (revoir § 33).

Pour remédier à ces inconvénients certains constructeurs recommandent un étalonnage simplifié facilement applicable sur le terrain juste avant de faire les mesures.

On constate qu'à une constante près dépendant de la nature de la membrane, on peut étalonner la sonde à l'air en se basant sur la table de saturation. En effet, il n'y a aucune différence entre une eau saturée et l'air qui est au-dessus de cette eau ; ils contiennent la même proportion d'oxygène. On constate expérimentalement (par un grand nombre de mesures) que la membrane de la sonde donne une indication plus forte dans l'air que dans l'eau saturée. Ainsi, avec une mince membrane de téflon, la sonde donne une indication par excès de 0,4 mg d'O₂ par litre à 0 °C dans l'air par rapport à l'eau saturée à la même température. A 30 °C, la sonde donne une indication supérieure de 0,6 mg/l dans l'air par rapport à l'eau saturée.

Entre ces deux températures, l'écart reste plutôt voisin de 0,5 mg/l.

On peut donc étalonner une sonde à l'air sans erreur grossière en majorant les valeurs de la table de saturation de Mortimer de 0,5 mg/l sans se soucier de la température. Par contre, si l'on se réfère au § 3.2. il est impératif de faire l'étalonnage à l'air en maintenant la sonde à la température de l'eau que l'on va mesurer.

On retiendra donc que l'étalonnage de la sonde de Clark sur la valeur de saturation peut être faite dans l'air à condition de maintenir la sonde à la température de l'eau que l'on veut mesurer. Tout écart de température important entre l'air et l'eau entraîne une erreur d'étalonnage due au mauvais comportement thermique de la membrane.

V. MESURE DE L'OXYGENE DISSOUS.

5.1. Préalables.

De ce qui précède, nous constatons que pour faire des mesures correctes d'oxygène, il faut d'abord :

- mettre la sonde sous tension et la polariser avant l'étalonnage ;
- la plonger dans l'eau que l'on veut contrôler pour la mettre à la bonne température avant de l'étalonner ;
- étalonner la sonde à la saturation, c'est-à-dire à l'air ;
- si le zéro chimique n'a pas été fait récemment il peut être bon de le vérifier si l'eau à mesurer est pauvre en oxygène (§ 4.2.).

5.2. Mesures ponctuelles manuelles.

Dès que la sonde est étalonnée, on la replonge dans l'eau que l'on veut contrôler, afin que la membrane ne subisse pas de changement de température avant la mesure.

On a vu § 3.5. que la sonde consomme l'oxygène qu'elle mesure et qu'il faut renouveler l'eau devant la membrane pour faire une mesure correcte. Deux cas de mesures ponctuelles peuvent se présenter :

5.2.1. Mesure d'oxygène dissous sur échantillons d'eau au laboratoire. (Figure 5).

(A) MAUVAIS

(B) BON

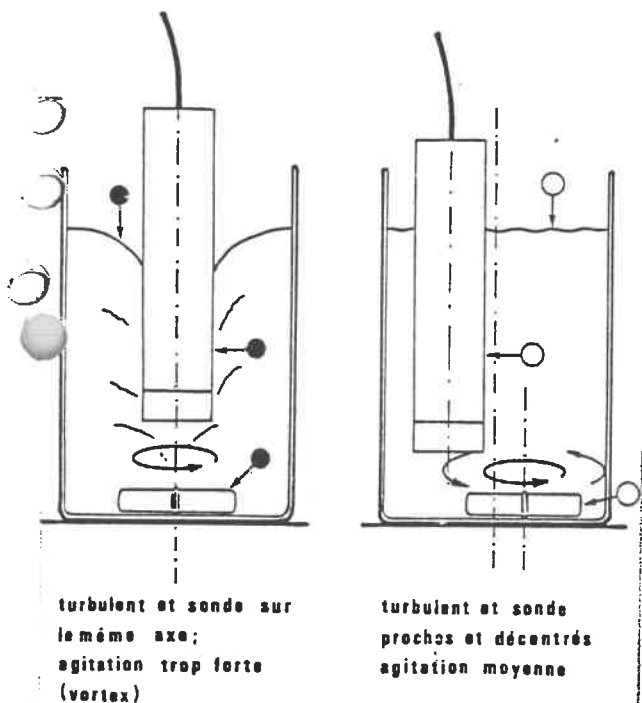


Fig. 5. — Mesure de l'oxygène dissous dans un échantillon d'eau, en béccher ou en flacon.

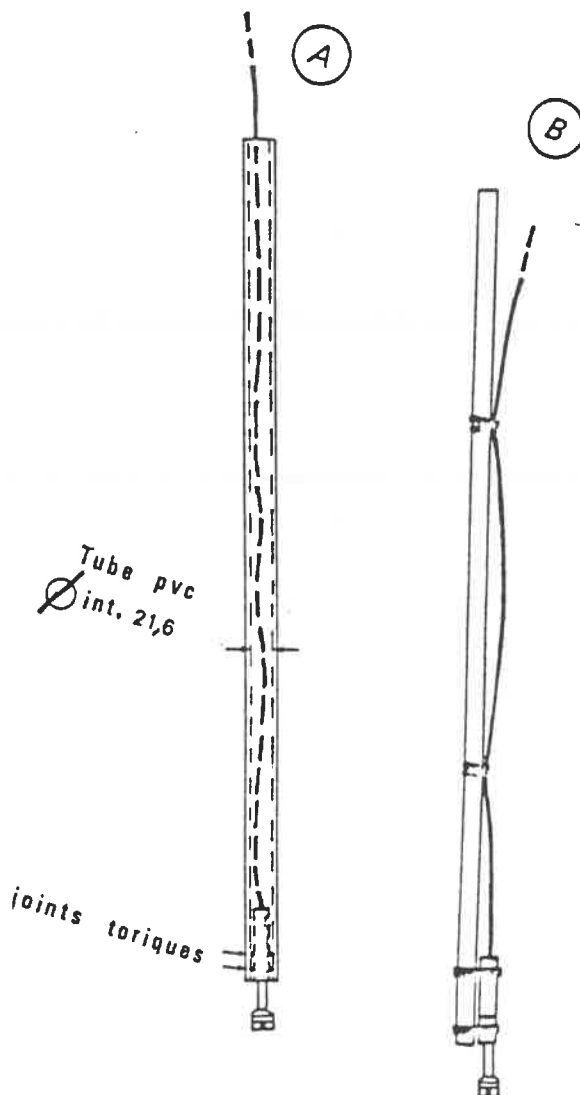


Fig. 6. — Montage de sonde sur perche ou tube.

Il s'agit d'eau fraîchement prélevée ou de flacons de mesure de D.B.O. (demande biologique en oxygène).

Introduire un turbulent (barreau aimanté) dans le béccher ou le flacon et poser le récipient sur l'agitateur que l'on met en marche.

Il faut éviter d'agiter trop fortement car on risque de fausser la mesure de l'air dans l'échantillon. Il vaut mieux avoir une vitesse de rotation moyenne de turbulent et le décentrer par rapport à la sonde. Si la valeur affichée est stable au bout de 10 à 15 secondes, la mesure est bonne.

5.2.2. Mesures ponctuelles en rivières ou en bassin :

Si l'eau circule rapidement (à plus de 50 cm/s) et sans turbulence, on peut simplement plonger la sonde dans l'eau pour faire la mesure. Si la valeur affichée n'est pas stable, c'est que la vitesse de l'eau n'est pas suffisante ou que la teneur en O_2 n'est pas

homogène. Il faut alors agiter la sonde assez rapidement pour obtenir une lecture stable. Si le plan d'eau n'est pas facilement accessible à l'opérateur il n'est pas très efficace d'agiter la sonde en secouant le câble. On risque de plus de heurter la sonde contre les piles du pont ou contre la berge d'où l'on opère. On a intérêt alors pour faire une mesure commode et sûre à fixer la sonde et son câble sur une perche de longueur suffisante. On peut pour cela aussi bien utiliser un bâton, un ou plusieurs éléments de canne à pêche ou un tube de pvc léger. (Fig. 6).

5.3. Mesure continue et enregistrement.

Si l'on veut faire des mesures continues sur plusieurs heures ou plusieurs jours, ou si l'on veut faire des mesures permanentes (alarmes de pisciculture ou régulation de station d'épuration par exemple), il faut placer la sonde dans un écoulement d'eau à vitesse suffisante. Il faut aussi se tenir à l'écart des zones de brassage où les bulles peuvent perturber la mesure (près des chutes et cascades ou des aérateurs).

Il faut aussi fixer la sonde pour éviter que ses mouvements perturbent la mesure et fatiguent le câble. Si l'on n'a pas une vitesse d'écoulement suffisante et constante, on peut accélérer le passage de l'eau devant la membrane par différents procédés.

- Si l'eau est claire (rivières ou piscicultures) on peut adapter à la sonde un dispositif d'agitation que propose généralement le fournisseur de l'équipement de mesure. Cet agitateur peut généralement aussi fonctionner dans des eaux turbides (trouble argileux, boues diluées diverses...).
- Si l'eau contient des matières fibreuses (déchets domestiques, fibres industrielles diverses) comme c'est le cas des eaux d'égout traitées dans les stations d'épuration, les dispositifs d'agitation doivent être beaucoup plus robustes et ne doivent pas accrocher les filasses en suspension dans l'eau. Les constructeurs ont dans ce cas des solutions plus diverses mais qui ne sont pas toujours satisfaisantes. C'est un point essentiel à ne pas négliger lorsque l'on veut faire de la mesure continue ou de la régulation d'oxygène en station d'épuration. On aura dans ce cas grand intérêt à essayer différents modèles avant de choisir l'oxymètre dont la sonde et l'agitateur sont adaptés au milieu que l'on veut contrôler. En effet, un dispositif d'agitation inefficace réduit considérablement l'intérêt du contrôle continu.

5.4. Contrôles du bon fonctionnement de la sonde et de sa dérive éventuelle.

Il est douteux, voire illusoire de contrôler un oxymètre par un autre oxymètre. Rien ne prouve en effet que l'oxymètre de contrôle est plus fiable que celui dont les mesures paraissent douteuses.

Il vaut bien mieux effectuer les contrôles classiques pour tous les oxymètres.

5.4.1. Contrôle de la température.

Un oxy-thermomètre doit être en conformité à un degré près avec un thermomètre à mercure de précision (lecture au dixième de degré).

Pour un oxymètre simple, on s'assure que la valeur de saturation correspond à la température indiquée par le thermomètre à un degré près.

5.4.2. Contrôle du zéro chimique (revoir § 4.2.).

Dans une solution saturée de sulfite de sodium, une sonde de Clark doit descendre à zéro en quelques minutes (en une demi-heure si elle est vieille de plusieurs années).

5.4.3. Contrôle de la saturation (revoir § 4.3.).

La sonde rincée après la mesure en oxy-nul et laissée à l'air doit remonter régulièrement et rapidement à la valeur de saturation (fonction de la température ambiante) et se stabiliser à cette valeur.

Si ces contrôles sont négatifs et si la sonde dérive rapidement après son étalonnage, il faut s'assurer que :

- Les piles électriques ou la batterie de l'appareil sont suffisamment chargées.
- Les contacts de piles ou de batterie sont nets et sans oxydation.
- La membrane de téflon est propre et non contaminée par des hydrocarbures, des corps gras ou une épaisse couche de bactéries ou d'algues.
- La membrane n'est pas crevée, ce qui n'est pas toujours visible à l'œil nu.
- L'électrolyte n'a pas fui et qu'il remplit la cuve électrolytique complètement et sans bulle d'air.

5.4.4. Si tous les contrôles opérés sont positifs, c'est dans le milieu contrôlé qu'il faut rechercher la cause de perturbation et de dérive :

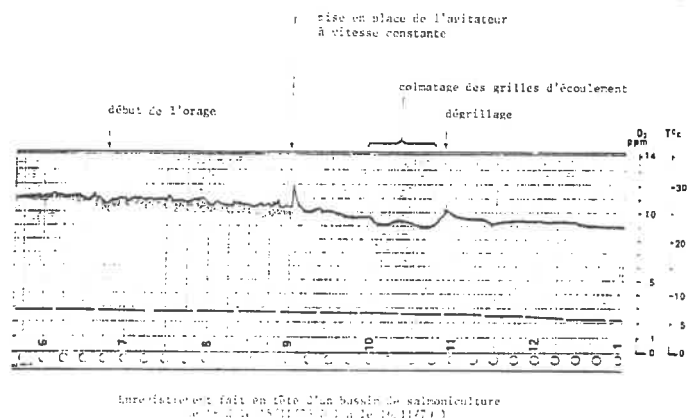


Fig. 7. — Influence de la turbulence et de la vitesse d'écoulement sur la qualité de la mesure d'oxygène et sur la lisibilité de l'enregistrement.

- Vitesse très variable de l'eau au point de mesure.
- Écoulement hétérogène : les filets d'eau qui passent près de la sonde n'ont pas la même vitesse ou la même concentration en oxygène dissous. L'écoulement turbulent de l'eau perturbe d'autant plus la mesure que la sonde n'est pas fixée et ballottée au gré des courants. Ces perturbations se traduisent par un enregistrement par nuage de points ; on n'obtient pas un tracé net des variations de teneur en oxygène dissous (fig. 7).

- Le milieu que l'on mesure a une très forte activité biologique et encrasse la membrane de la sonde : c'est le cas des milieux suivants :

— Pisciculture : dépôt d'un enduit de mucus dans les bassins très chargés en truites. De plus, ce mucus est le support nutritif de bactéries.

— Etangs et lacs à forte activité estivale : le développement des bactéries et des algues dans un milieu riche en matières organiques et en oxygène (produit par la photosynthèse de la végétation aquatique) colmate vite la porosité de la membrane.

— Dans le cas aussi de forte activité photosynthétique, on peut être étonné par des teneurs très élevées en oxygène dissous : il n'est pas rare que les après-midi d'été, un étang ait des teneurs en O_2 dissous de 15 à 25 mg/l alors que la température de l'eau est assez élevée pour que la saturation ne dépasse pas 9 mg/l. C'est la photosynthèse végétale qui est alors responsable de cette sursaturation en oxygène.

Stations d'épuration : une sonde plongée plus de 24 heures dans des boues activées de station d'épuration biologique, sans agitation suffisante et sans nettoyage permanent ou fréquent, donne rapidement des valeurs inférieures à la teneur réelle en O_2 dissous : l'accumulation des bactéries sur la membrane réduit considérablement la circulation de l'oxygène dissous.

On a, en fait, cumul de trois facteurs nuisibles à la mesure :

- Vitesse d'écoulement insuffisante.
- Respiration des bactéries qui consomme une fraction de l'oxygène disponible.
- Colmatage de la porosité de la membrane par l'accumulation des bactéries.

La sonde peut alors indiquer zéro alors que l'oxygène disponible dans les boues est de 2 mg/l ou plus. La dérive négative observée correspond alors à l'encrassement progressif de la membrane.

- Pollution imprévue du milieu par des corps gras, des colloïdes industriels ou des hydrocarbures. Toutes ces substances ont aussi pour effet de colmater la membrane.

- Variations importantes de la pression atmosphérique :

Si l'on étalonne la sonde à la pression atmosphérique normale, puis que la situation atmosphérique évolue au cours de la période d'enregistrement (passage d'un orage, évolution vers de hautes pressions de beau temps, on peut constater une dérive notable lorsque l'on réétalonne la sonde. Lorsque l'on veut faire des mesures précises il faut les accompagner de mesures barométriques qui permettront de corriger a posteriori les teneurs d'oxygène enregistrées.

A titre d'exemple, une variation de pression atmosphérique de 760 mm de mercure (pression normale) à 834 mm de mercure (haute pression) provoque un écart de 1 mg/l sur la saturation à 10 °C (revoir § 3.3. et tables annexes).

- Variations importantes de la température : les variations importantes de température de l'eau (forte insolation d'un plan d'eau, rejets d'eau chaude industrielle, etc.) outre leur effet sur la solubilité de l'oxygène (revoir § 3.1.) peuvent faire dériver la sonde par rapport à son étalonnage de départ (revoir § 3.2.).

- Variations de salinité. Lorsque l'on mesure l'oxygène dissous dans des estuaires ou des lagunes littorales des apports marins peuvent perturber la mesure (revoir § 3.4.).

L'inventaire de ces différents cas montre que les valeurs aberrantes de la teneur en oxygène dissous proviennent aussi bien de variations imprévues des facteurs extérieurs que d'une défaillance de la sonde. L'observation du milieu pendant les mesures est aussi indispensable que le contrôle de la sonde pour interpréter une dérive apparente ou réelle de la sonde.

VI. INTERPRETATION DES MESURES.

Les différents cas envisagés au paragraphe 5.4. montrent qu'il est risqué d'utiliser les données brutes de l'enregistrement ou des mesures ponctuelles sans précautions. Tout dépend en fait du degré de précision recherché et de l'usage qui sera fait des mesures. Si l'on ne recherche qu'une valeur indicative, un ordre de grandeur de la teneur en oxygène dissous, un étalonnage correct et une vitesse assez rapide de l'eau suffisent pour avoir des mesures exploitables.

Si, au contraire, on recherche la précision et si l'on veut analyser les causes des variations de teneur observées, il faut prendre de nombreuses précautions pour être sûr de la fiabilité des mesures :

6.1. Contrôle de la fiabilité.

Lorsque l'on fait plusieurs heures de mesure discontinue (en laissant la sonde dans le milieu de mesures) ou continue il faut :

6.1.1. Contrôler au départ et à la fin de la période de mesure, la pression, la température ambiante, la salinité (ou la conductivité) de l'eau. Dans le meilleur des cas, on mesure aussi ces paramètres en continu.

6.1.2. Avant de ressortir la sonde de l'eau, on vérifie qu'elle n'ait pas été déplacée, embourbée dans la vase du fond, entortillée d'algues ou d'herbes, etc.

On vérifie ensuite son état avant et après rinçage.

6.1.3. Réétalonner à la saturation et en oxy-nul à la fin de la période de mesure et noter des écarts de température et d'oxygène entre l'étalonnage de départ et celui de fin de mesure. Si les écarts sont importants, on vérifie l'état du matériel et on remet la sonde dans les conditions d'utilisation de départ (on la réétalonne à la température initiale).

6.2. Contrôle des facteurs de perturbation du milieu.

Si l'examen de l'enregistrement des teneurs en oxygène dissous montre des variations inattendues il faut comparer à l'enregistrement des autres paramètres du milieu :

- pression atmosphérique,
- température de l'eau,
- conductivité,
- éventuellement insolation et nébulosité.

Si l'on fait des mesures complètes, il faut aussi comparer avec les mesures pH, niveau, turbidité, (indicateurs d'orage, de crue ou de pollution inopinée).

Si l'on constate que les variations de teneur en oxygène dissous coïncident avec des variations de un ou plusieurs autres paramètres, il faut corriger les mesures en fonction de certains de ces paramètres.

6.3. Correction des mesures perturbées.

On ne corrigera pas les mesures d'oxygène en fonction du pH, de la turbidité ou du niveau. La variation de ces paramètres confirme simplement qu'il y a eu perturbation du milieu pendant les mesures.

Par contre, on fera des corrections si la pression atmosphérique, la température de l'eau et sa salinité ont notablement varié.

6.3.1. Correction de pression et de salinité.

Elles sont simples : les tables données en annexes permettent d'appliquer des coefficients de correction facilement, afin que les teneurs corrigées soient comparables à la teneur notée au début de la période de mesure. On peut ainsi apprécier exactement l'effet de ces deux paramètres sur le milieu mesuré.

6.3.2. Correction de température.

Elle n'est à faire que si les variations de température ont été importantes et brutales. Sinon, la compensation automatique de température dont sont

munis la plupart des oxymètres actuels assure la correction directe des mesures.

Quand la température varie brutalement de plusieurs degrés, la compensation automatique suit avec un certain retard dû à la masse calorifique de la sonde. Le mieux, si cette perturbation dure longtemps est de réétalonner l'oxymètre, de noter l'écart avec l'étalonnage de départ et de corriger les mesures par approximations successives.

6.3.3. Variation de la vitesse d'écoulement de l'eau devant la sonde. (Revoir § 3.5. et figure 4).

Lorsque l'on constate que le niveau de l'eau a largement varié au cours de la période de mesure (crue d'orage, rejet important par rapport au débit propre du cours d'eau), on peut penser, en l'absence d'agitateur, que les variations consécutives de la vitesse d'écoulement ont perturbé la mesure.

- Si le niveau a augmenté, on a toute raison d'estimer que la vitesse a augmenté. Si la vitesse initiale était supérieure à 50 cm/s, il n'y a pas de correction à apporter car la mesure n'a varié que de 97 % à 100 % de la teneur réelle. L'erreur est donc au maximum de 0,3 mg/l, par rapport à la saturation. Elle ne peut donc dépasser 0,15 mg/l dans une eau contenant 5 ou 6 mg/l d'oxygène dissous. Cette erreur n'est même pas appréciable dans des boues dont la teneur dépasse rarement 2 mg/l.
- Si le niveau de l'eau a baissé entre le début et la fin de la période d'enregistrement, on peut corriger les mesures en se basant sur la courbe $O_2 = f(v)$ de la figure 4. Cela ne présente d'intérêt que si la vitesse d'écoulement est tombée en dessous de 20 cm/s. Cette correction est d'autant plus aléatoire que cette décroissance de la vitesse est irrégulière.

La seule précaution à prendre pour éviter ces variations est d'utiliser un agitateur qui entretient une vitesse d'écoulement supérieure à la vitesse critique minima.

6.4. Exemples d'interprétation.

6.4.1. Revenons à la figure 7 (qui illustre le § 5.4.4.). Il s'agit d'une partie d'un enregistrement fait sur un bassin de pisciculture de truites.

On reviendra plus loin sur l'utilisation de la partie gauche de la figure. A partir de la mise en place de l'agitateur, la courbe bien lisible indique une baisse de la teneur en oxygène suivie d'une remontée, puis d'une nouvelle baisse, plus lente et régulière. Sans notation du contexte des mesures, l'enregistrement est ininterprétable. La séquence correspond à un orage.

Les eaux pluviales augmentent généralement le taux d'oxygène. Mais d'autres facteurs, au contraire, le diminuent. L'accroissement du débit augmente la vitesse d'écoulement. Les truites déjà énervées par

l'orage se dépensent davantage pour se maintenir dans le courant d'eau renforcé. Elles consomment donc davantage d'oxygène. Cette consommation peut aussi s'accroître si les truites sont gênées par la turbidité de l'eau consécutive à l'orage. Entre 21 h 15 et 22 h 45 le taux d'oxygène baisse plus vite et de manière variable, puis remonte brutalement à 22 h 50. Ces variations sont dues au colmatage des grilles par les feuilles mortes entraînées par la crue (l'enregistrement a été fait en automne dans une région de bois et de bocage avec des arbres à feuilles caduques).

Lorsque le pisciculteur a nettoyé les grilles, l'écoulement s'est accéléré le temps que le bassin retrouve son niveau d'eau normal. La teneur en oxygène a varié d'autant. La baisse de la teneur constatée en cette circonstance correspond non plus à la surconsommation des truites mais à la décrue après l'orage et au fait que la photosynthèse ne maintient plus le taux d'oxygène à cette heure de la nuit, bien que la température baisse.

On voit que sans la notation des phénomènes environnants, on ne peut pas exploiter utilement l'enregistrement. L'enregistrement suivant est synthétique et regroupe les diverses causes de variation de la teneur en oxygène au cours d'une journée.

6.4.2. Cet enregistrement est la synthèse de deux enregistrements de mesure d'oxygène dissous (fig. 8). L'un à l'amont de la pisciculture, directement dans la rivière, l'autre dans un des bassins à truites. Une seule courbe de température est représentée car il n'y a pas de différence sensible entre les deux points de contrôle.

L'enregistrement commence en fin de journée. On voit que le coucher du soleil entraîne une baisse rapide de la teneur en oxygène dissous, due à l'arrêt de la production de la photosynthèse végétale.

Parallèlement, le métabolisme des truites se réduit ce que montre leur faible consommation d'oxygène (les courbes d'oxygène à l'amont et dans le bassin baissent mais sont très proches).

On constate que les perturbations de la vie des truites (visites du pisciculteur, passage d'un prédateur nocturne près du bassin) sont enregistrées par une baisse brutale, de courte durée, des taux d'oxygène.

Cela correspond à une suractivité des poissons excités ou affolés. Ce stress entraîne une consommation accrue d'oxygène d'autant plus sensible que le bassin est chargé. La consommation d'oxygène est aussi accrue lors de l'alimentation. On distingue deux phases de consommation : 1^{er} temps : frétaillement avec respiration accrue lors de la distribution d'aliment. 2^e temps : la consommation d'oxygène reste au-dessus de la moyenne pendant une demi-heure à une heure correspondant au début de la digestion.

On constate aussi que la consommation d'oxygène par le poisson ne croît pas autant que la production photosynthétique. Cette dernière croît et décroît très rapidement au lever et au coucher du soleil, mais avec environ deux heures de décalage par rapport au mouvement apparent du soleil : en effet la photosynthèse est faible lorsque les rayons lumineux ont une incidence basse sur le plan d'eau. La photosynthèse est par contre à son maximum lorsque le soleil est au zénith et que son rayonnement est perpendiculaire au plan d'eau. La plus forte production d'oxygène se fait, comme le montre l'enregistrement, entre 14 et 17 heures. La fin de l'enregistrement correspond à celui de la figure 7.

On voit tout le parti que l'on peut tirer d'un enregistrement : prévision de l'heure et de l'amplitude des variations journalières de la teneur en oxygène ; choix des horaires d'alimentation ; évaluation de l'importance des stress en fonction de la densité de la population des bassins, etc.

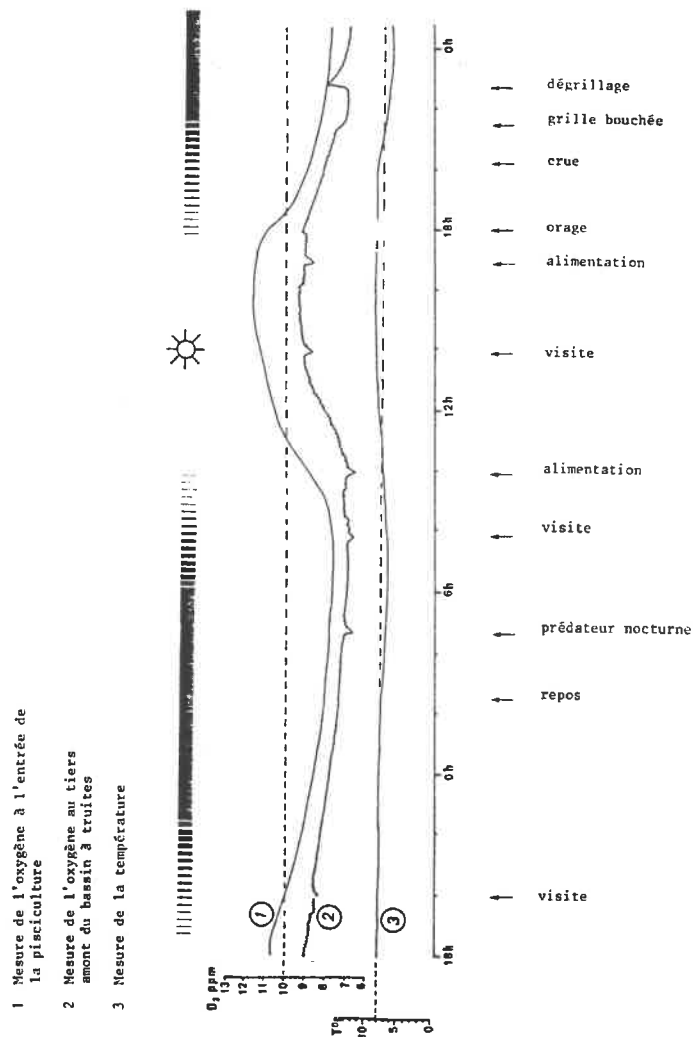


Fig. 8. — Variations journalières de la teneur en oxygène dissous dans un bassin de salmoniculture.

Mais l'utilisation d'un enregistrement ne peut se faire qu'a posteriori et en ayant soigneusement observé les causes possibles de perturbation pour pouvoir apprécier leurs effets sur le milieu ou le cheptel dans le cas d'une pisciculture.

6.5. Lissage des courbes d'enregistrement.

On a vu dans la partie gauche de la figure 7, un exemple d'enregistrement mal réalisé (sonde non fixée et circulation trop lente de l'eau). Pour utiliser cette partie de l'enregistrement il faut « lisser » la courbe, c'est-à-dire réduire le nuage de points à un trait fin.

6.5.1. Le raisonnement le plus simple est de penser que les points hauts du nuage sont plus proches de la teneur réelle en oxygène et correspondent aux instants où la vitesse était suffisante pour assurer une mesure fiable. On relie alors ensemble par un trait seulement les points hauts du nuage (fig. 9).

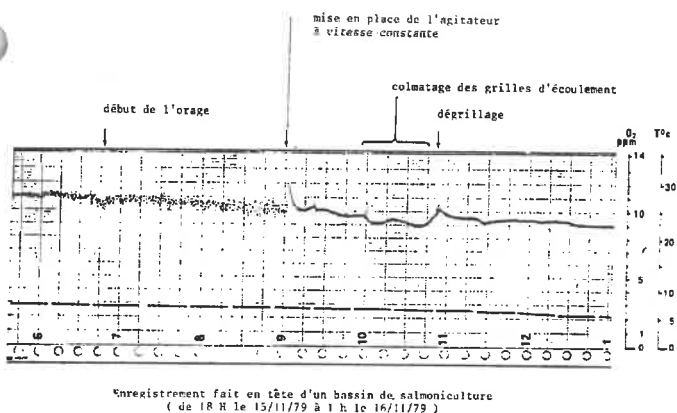


Fig. 9. — Influence de la turbulence et de la vitesse d'écoulement sur la qualité de la mesure d'oxygène et sur la lisibilité de l'enregistrement.

Ce lissage est empirique et uniquement inspiré par l'expérience de terrain.

6.5.2. Une autre méthode est de faire une régression linéaire. En résumé, il s'agit de ramener les points du nuage vers son axe qui dessine alors une courbe médiane et les valeurs des points les plus éloignés sont atténués.

Cette méthode qui raisonne sur des moyennes statistiques, rend moins compte de la réalité du cas présent.

VII. CONTRAINTES D'UNE MESURE FIABLE.

Après l'exposé des facteurs de perturbation de la mesure et des difficultés de son interprétation, il est maintenant évident qu'il ne faut pas en plus douter de la fiabilité de la sonde. Il faut donc limiter au maximum les risques de mauvais fonctionnement. Il faut donc s'astreindre à un bon entretien de la sonde et à l'exécution rigoureuse des instructions d'utilisation pour obtenir des résultats sûrs et exploitables.

7.1. Stockage et entretien de la sonde.

Après les mesures, la sonde doit toujours être soigneusement rincée, puis maintenue humide ou dans de l'eau propre.

Il faut toujours s'assurer que le serrage de la membrane assure l'étanchéité de la cuvette : la dilution de l'électrolyte par diffusion crée une dérive importante au cours des mesures et c'est aussi un facteur de vieillissement de la sonde (§ 8.2.).

Lorsque l'on vient de changer la membrane de la sonde ou de remettre de l'électrolyte, il faut brancher la sonde au moins une heure avant l'étalonnage, afin que se rétablisse l'équilibre électrochimique.

7.2. Mise en marche et étalonnage.

Lorsque l'on met la sonde sous tension, il faut attendre quelques minutes pour qu'elle se polarise. Pendant ce temps, on peut déjà la mettre dans l'eau pour qu'elle se mette à la température de mesure pour obtenir la compensation de température avant l'étalonnage (revoir § 3.2.).

On procède ensuite à l'étalonnage à la saturation (voir § 4.3.1.). Lorsque l'on doit faire des mesures enregistrées, l'étalonnage doit être particulièrement soigné et il vaut mieux augmenter le temps de compensation de la température.

Si au bout de quelques heures, compte tenu des variations éventuelles de température, l'étalonnage n'est plus bon, les trois causes courantes sont : étalonnage prématuré avant la compensation de température ; membrane mal fixée ou percée, entraînant la dilution de l'électrolyte par l'eau ambiante ; variation importante de la pression atmosphérique.

7.3. Agitation et vitesse d'écoulement de l'eau.

7.3.1. Pour les mesures ponctuelles, il suffit d'aller à la main, pour obtenir une vitesse de passage de l'eau

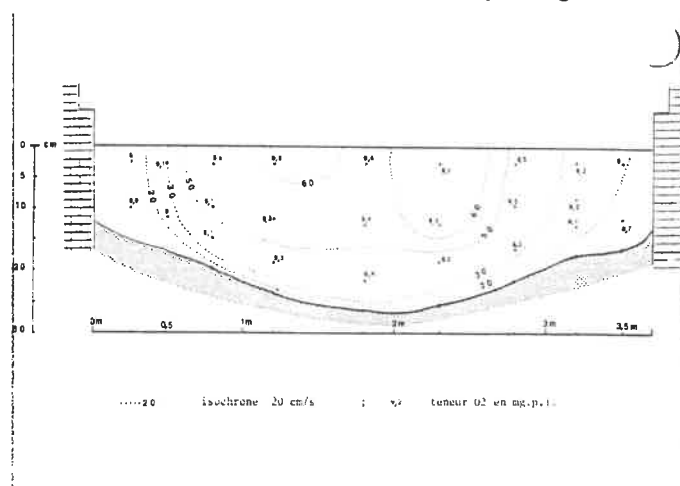


Fig. 10. — MESURES SIMULTANÉES DE VITESSE ET D'OXYGÈNE. Jaugeage du GUINDY au Pont de GUINDY (LANGOAT - Côtes-du-Nord) le 29-8-78

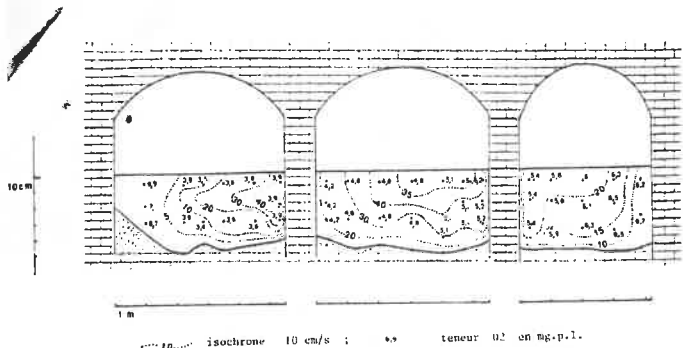


Fig. 11. — MESURES SIMULTANÉES DE VITESSE ET D'OXYGÈNE. Jaugeage du TRIEUX à SQUIFFIEC (6 km à l'aval de GUINGAMP), le 30-8-78. Passage d'une pollution non répartie.

devant la membrane suffisante (revoir § 3.5.). La valeur affichée se stabilise à un maximum dès que l'écoulement agite suffisamment vite.

7.3.2. Pour les mesures continues, enregistrées, il faut placer la sonde dans la partie la plus rapide de l'écoulement, en veillant à ce qu'il n'y ait pas de turbulence. La figure 10 montre une section de rivière où ont été faites simultanément des mesures de vitesse et des mesures d'oxygène.

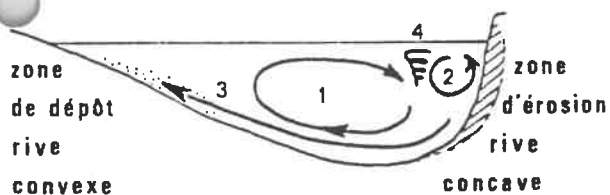
On voit que, conformément à l'expérience, (revoir § 3.5. et figure 4) les mesures des deux paramètres sont à peu près liées. « A peu près », parce que dans un milieu quelconque on n'a pas l'homogénéité de l'expérimentation au laboratoire. La température n'est pas uniformément réparties (fig. 11).

De plus, les vitesses mesurées dans le cours d'eau sont des vitesses moyennes en chaque point, calculées sur 50 ou 100 secondes de mesure, alors que la lecture de l'oxymètre est instantanée.

Il aurait aussi fallu mesurer la teneur en oxygène pendant 50 ou 100 secondes et prendre la valeur moyenne comme pour la vitesse.

Cependant, l'expérience en rivière est assez concluante pour que l'on voie l'importance du choix du point de mesure de l'oxygène dissous.

La figure 12 montre comment s'organise l'écoulement de l'eau dans une section de rivière sinueuse



- 1 et 2 écoulement principal en spirale ou en rouleau
- 3 courant traversier
- 4 remous de convection

Fig. 12. — Ecoulement dans une rivière à lit naturel et sinueux.

ce qui est le cas naturel le plus courant. On voit que les lignes d'eau suivent trois trajets différents :

- Courant longitudinal en rouleau ; l'eau s'écoule en décrivant une spirale dans la partie la plus profonde de la rivière.
- Courant traversier : une partie des lignes d'eau du courant longitudinal s'écarte et vient baigner la rive à faible pente. Il y a perte de vitesse et dépôt des matières en suspension les plus lourdes (limons, sables,...).
- Remous et tourbillons qui font la transition entre les deux courants principaux. La vitesse de l'eau dans les remous et tourbillons varie constamment et, au centre d'un remous, peut être nulle.

On peut aussi avoir des zones abritées des courants principaux où l'eau circule très lentement à une vitesse quasi nulle (anses, méandres en colmatage... on parle d'eau dormante).

Si l'on veut connaître la teneur en oxygène dissoute moyenne du cours d'eau, il faut placer la sonde dans le courant longitudinal rapide.

La figure 13 représente quelques centaines de mètres d'un cours d'eau naturel à méandres, avec les sections transversales typiques. On voit ainsi mieux où il est intéressant de faire des mesures d'oxygène dissous représentatives.

En résumé : un cours d'eau est un milieu hétérogène. Le choix d'un point de mesure y est délicat et doit se porter sur les zones où l'écoulement est le plus uniforme et le plus rapide.

7.4. Prise en considération des circonstances de la mesure et description du milieu ambiant.

Si l'on veut pouvoir comparer des mesures à divers moments — quelquefois très éloignés —, (mesures hebdomadaires, mensuelles ou annuelles) il faut noter avec précision leur contexte.

Outre la date et l'heure de la mesure ou du début de la période d'enregistrement, il est bon de noter la température ambiante, la situation météorologique (temps clair ou nuageux, pression atmosphérique, vent, etc.). On notera aussi l'environnement : rives dégagées ou boisées, végétation aquatique ; zone urbaine, rejets, etc.

Il est aussi nécessaire de noter les caractères hydrologiques du moment : niveau de l'eau, limpidité ou trouble, nature du fond (vaseux, sableux, rocheux,...).

Toutes ces observations répétées à chaque mesure permettent d'interpréter les résultats et de déceler la cause des variations du paramètre mesuré. Une fois que l'on a ainsi pu éliminer les perturbations parasites, on peut apprécier l'évolution d'ensemble du milieu mesuré.

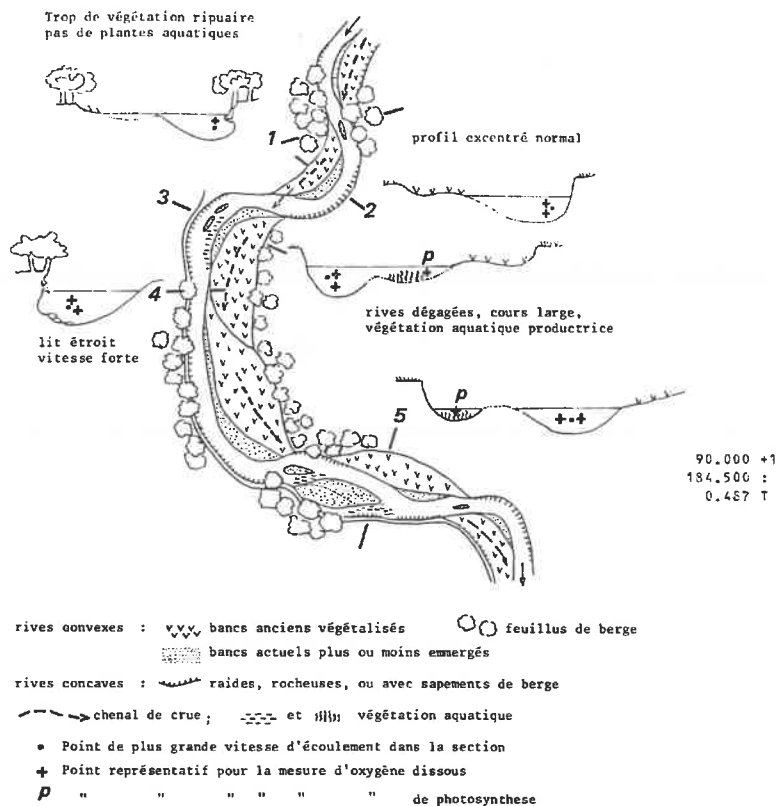


Fig. 13. — POINTS REPRESENTATIFS DE LA TENEUR EN OXYGENE DISSOUS DANS UN COURS D'EAU NATUREL.
 Site : La Bruche en aval (Plaine d'Alsace).

VIII. DETERIORATION ET VIEILLISSEMENT DES SONDES.

8.1. Indices de détérioration :

8.1.2. Dérive régulière et importante : dilution de l'électrolyte par communication avec le milieu ambiant.

Il faut vérifier :

- que la membrane est bien positionnée. Dans les sondes à joint torique, vérifier qu'il est encore bon et qu'il écrase bien les plis latéraux de la membrane ;
- que la membrane n'est pas déchirée. Mais une microperforation, invisible à l'œil nu ou avec une loupe usuelle, assure une fuite liquide suffisante pour diluer rapidement l'électrolyte. Le plus sûr contrôle est de changer la membrane ;
- que l'équilibreur de pression est en bon état et bien en place.

8.1.2. Lecture instable lorsqu'on remue la sonde : ce défaut est généralement dû à un manque d'électrolyte, plus rarement à une lésion du câble de sonde.

8.1.3. Impossibilité de caler le zéro chimique (revoir § 4.2.). Causes :

- soit membrane arrachée. (la remplacer).

— soit, à la suite d'un choc violent, rupture de la gaine isolante de la cathode. La sonde est alors irréparable.

8.2. Indices de vieillissement, régénération :

Une sonde neuve, après branchement et étalonnage donne une réponse stable en quelques secondes ou dizaines de secondes.

Au bout de quelques mois d'usage fréquent, on constate que les temps de réponse augmentent de plus en plus, aussi bien lors des étalonnages à saturation et au zéro que lors des mesures.

Si l'on est assuré que cette lenteur ne provient pas de l'encrassement de la membrane, il faut en général renvoyer la sonde au constructeur pour qu'il la régénère.

8.3. Vieillissement dû à la conception des sondes.

La réaction électrochimique qui s'effectue dans la sonde a deux conséquences :

8.3.1. Electrolyse de l'anode d'argent. Les atomes d'argent de l'anode passent progressivement dans l'électrolyte et se déposent (sous forme de chlorure d'argent) en partie sur la surface active de la cathode (revoir § 2.1. et 2.2.). Cette « usure » électrochimique est normale et irrémédiable. Lorsque l'anode est totalement électrolysée la sonde est à changer.

8.2. Le chlorure d'argent de l'anode de l'argent de l'anode troyite, se dépose et ce dépôt qui augmente la sonde.

8.3.2. Le chlorure d'argent — qui se forme à partir de l'argent de l'anode et du chlore libéré par l'électrolyte —, se dépose en partie sur la cathode. C'est ce dépôt qui augmente le temps de réponse de la sonde (voir § 8.2.).

Lorsque ce dépôt ne permet plus un usage normal de la sonde, il faut régénérer la sonde. C'est-à-dire que l'on élimine le dépôt par un repolissage de la surface de la cathode.

8.3.3. Une autre cause de vieillissement est le comportement de la gaine d'isolation de la cathode. Cette gaine est dans la grande majorité des cas en résine synthétique. Les résines (CPV, araldite, etc.) ne sont pas inaltérables. Leur vieillissement entraîne des craquelures et des décollements de la gaine qui met la cathode au contact direct de l'électrolyte. On a alors une lecture de court-circuit comme au § 8.1.3.

Le seul type inaltérable par le temps est l'ensemble cathode métal-verre où la gaine isolante est en verre soudé sur le barreau métallique de la cathode.

Ces sondes de cette conception durent autant que dure l'anode. En utilisation normale elles peuvent durer plus de dix ans.

8.4. Vieillesse dû au mode d'utilisation des sondes.

8.4.1. La cause la plus fréquente est une mauvaise étanchéité de la sonde (membrane mal posée ou en mauvais état; équilibre de pression détérioré). La diffusion de l'électrolyte accélère la précipitation de chlorure d'argent (chloruration) sur la cathode.

8.4.2. Effet de la suractivité :

De nombreuses techniques modernes utilisent de l'oxygène pur dont on doit contrôler le débit pour des raisons d'économie et de sécurité. C'est le cas de divers types de « dopages » de boues activées pour l'épuration des eaux. C'est aussi le cas de systèmes de suroxygénation de bassins d'élevage piscicole.

Le contrôle de la teneur en oxygène dissous dans le liquide — eau ou boues activées —, se fait comme dans les cas usuels. Mais on peut être amené à contrôler aussi la teneur en oxygène de l'atmosphère confinée, suroxygénée, qui sert à enrichir en oxygène le milieu liquide. Dans ce cas, la sonde mesure des teneurs de deux à cinq ou six fois la teneur de saturation.

Le courant créé dans la sonde par un tel apport d'oxygène accélère l'érosion électrochimique de l'anode (revoir § 2.2. et 8.3.1.). L'anode peut alors être électrolysée en quelques semaines au lieu de plusieurs années d'usage quotidien si elle n'a pas été assez largement dimensionnée.

Dans un milieu naturel, on peut aussi mesurer des sursaturations importantes activant l'usure de l'anode. Certains plans d'eau calmes (étangs, mares, biefs

de rivières lentes,...) ont, en été, une prolifération d'algues et de plantes aquatiques. Ces végétaux pendant les heures de grand ensoleillement et de chaleur produisent d'importantes quantités d'oxygène de photosynthèse. Dans une eau à 20 °C dont la saturation à pression normale est de 9,1 mg/l, il n'est pas rare alors de mesurer des teneurs de 16 à 20, voire 25 mg/l d'oxygène dissous. De telles teneurs sont d'ailleurs difficiles à mesurer avec précision car le seul fait d'agiter la sonde, pour faire une mesure correcte, tend à dégazer l'eau et à la ramener à la saturation normale. En effet, dans ce cas, l'eau contient plus d'oxygène que l'air ambiant et tend à lui en restituer pour rétablir l'équilibre (loi d'équilibre des pressions partielles des gaz).

Cependant, ces mesures de suroxygénation naturelle sont moins fréquentes que les contrôles de sursaturation artificielle. Elles réduisent donc peu la durée de vie normale d'une sonde d'oxygène.

8.4.4. Interférence de divers produits chimiques.

- L'eau de Javel.
- C'est un oxydant qui se décompose en libérant de l'oxygène selon la réaction :



Lorsqu'en prophylaxie piscicole on désinfecte une sonde à l'eau de Javel, il faut donc attendre que toute l'eau de Javel soit réduite avant de refaire des mesures, sinon ces dernières sont faussées par excès.

- La stérilisation de l'eau par le chlore ne fausse guère les mesures en raison des faibles concentrations utilisées (de l'ordre de 0,1 mg/l). Ici aussi on a une réaction oxydante :



- L'hydrogène sulfuré H₂S. C'est un gaz produit par la décomposition de la matière organique. Il accompagne surtout la formation de méthane en milieu anaérobie (absence d'oxygène). Il s'en forme un peu dans les boues activées aérobies des stations d'épuration. Bien qu'il se combine facilement à l'argent, il ne semble pas avoir d'effet sur la sonde. Le gaz est en effet peu soluble, aussi bien dans l'eau que dans l'électrolyte et la taille de ses molécules ne lui permet pas de traverser facilement la membrane de téflon comme l'oxygène.

- Le gaz carbonique CO₂. Même dissous à des fortes teneurs, il ne semble pas que le gaz carbonique agisse sur la sonde. Sa molécule est beaucoup plus grosse que celle de l'oxygène et ne traverse pas la membrane de téflon. Dans les eaux naturelles à la pression atmosphérique la solubilité du gaz carbonique en fonction de la température de l'eau, varie comme la solubilité de l'oxygène. Mais, comme pour la salinité (revoir § 3.4.) un soluté diminue l'autre. Une teneur forte en CO₂ réduit

donc la teneur de saturation en oxygène de l'eau à une température donnée.

Anhydride sulfureux = SO_2 . Il n'a pas d'effet sur la sonde car il ne traverse pas la membrane. Mais c'est un puissant réducteur, qui se combine très fortement à l'oxygène ambiant. C'est pour cela qu'on l'utilise sous la forme sulfite pour préparer les solutions oxy-nul (revoir § 4.2.).

IX. INTERET DE LA MESURE CONTINUE ET ENREGISTREE.

9.1. Grande variabilité de paramètre.

Outre l'action des facteurs physiques de variation de la concentration en oxygène dissous (revoir chap. III) bien des phénomènes agissent aussi sur cette concentration : la production photosynthétique (revoir § 8.4.3.); la consommation d'oxygène par la décomposition des matières organiques (d'origine naturelle ou provenant des activités humaines); la respiration de la faune aquatique (particulièrement en pisciculture). En pisciculture aussi les variations du métabolisme des poissons (alimentation, stress, taux de charge des bassins...) agissent sur la teneur en oxygène. De même, la mesure de l'oxygène informe sur une variation du milieu (exemple : grille de bassin bouchée par des feuilles — § 6.4.2.).

On voit dans ce contexte que la mesure de l'oxygène dissous n'est pas une fin en soi, mais le moyen de quantifier les facteurs de variation de sa teneur. **C'est un outil de mesure d'autres paramètres.** Dans la majorité des cas, ce qui est instructif n'est pas la teneur à un instant donné (surtout si l'on ne contrôle pas simultanément les autres paramètres de base, pression, température,...) mais l'amplitude et la fréquence des variations. L'enregistrement en continu avec les observations concomitantes sur le milieu (revoir § 7.4.) permet d'interpréter les causes de variations de la teneur et d'agir sur le milieu mesuré pour rétablir son équilibre. Par exemple, en pisciculture, un manque d'oxygène peut provenir d'une surpopulation des bassins, d'une alimentation mal distribuée, d'une accumulation des déjections, etc. La variation de la teneur en oxygène incite le pisciculteur à en rechercher la cause, surtout lorsque celle-ci n'est pas évidente. En somme, la mesure continue de l'oxygène dissous complète la vigilance et le sens de l'observation du pisciculteur.

9.2. Comme la mesure continue, grâce au diagramme enregistré peut être exploitée en détail a posteriori elle s'avère d'une grande richesse : reprenons l'exemple de la figure 8 au § 6.4.2. Qui « s'amuserait » à mesurer trente ou cinquante fois en 24 heures la teneur en oxygène d'un bassin, tout en observant les conditions ambiantes de la mesure ? Personne !

Par contre, en dépouillant le diagramme on se rappelle des faits mémorisés inconsciemment au cours

de la journée, ou de la nuit, et le diagramme permet d'apprécier leurs effets sur la teneur en oxygène, donc sur l'état du cheptel et sur sa croissance. Ces corrélations permettent de prévoir l'action de phénomènes identiques ultérieurs et de la corriger par avance.

En fonction de l'enregistrement, on changera par exemple la qualité et la quantité d'aliment, ou les heures d'alimentation par rapport au cycle journalier de la photosynthèse. Ou on prendra davantage garde aux effets d'un orage ou de visites trop fréquentes sur les bassins, etc.

9.3. Puisque dans le cas de la mesure enregistrée, l'oxymètre contrôle en permanence le milieu, il peut soulager l'utilisateur d'une surveillance continue et astreignante. Il suffit pour cela de coupler l'oxymètre à un système d'alarme pré-réglé en fonction des besoins : l'appareil peut, par exemple déclencher l'alarme chaque fois que la teneur en oxygène varie trop brutalement par rapport à une valeur normale pour le bon développement du cheptel.

Pour un bassin ayant un débit d'eau fixé et une charge en poisson donnée, on pourra régler l'appareil pour que l'alarme se déclenche chaque fois que la teneur en oxygène chutera en dessous de 7 mg/l ou au contraire, dépassera 11 mg/l. Théoriquement, on pourrait se contenter de l'alarme minimum. En fait, comme la sonde de mesure (ou l'oxymètre lui-même) peut avoir une défaillance qui donne une valeur élevée mais fautive, il vaut mieux, pour une faible majoration de prix, avoir les deux alarmes minimum et maximum.

De plus, si le point d'alarme minimum sert aussi à la mise en marche automatique d'un système d'aération, par souci d'économie d'énergie, ou d'oxygène industriel, il vaut mieux aussi avoir une alarme maximum qui arrête l'apport d'oxygène avant une teneur excessive.

Ce système constitue un dispositif de régulation. La sécurité qu'il apporte, s'il est bien entretenu et réglé, ainsi que son économie, font qu'il est de plus en plus utilisé dans les installations où la teneur en oxygène dissous est le facteur de bon fonctionnement essentiel. C'est le cas de la pisciculture de salmonidés et dans un tout autre domaine, de l'épuration biologique aérobie des eaux usées.

CONCLUSION.

Si cet exposé a confirmé l'intérêt de la mesure de l'oxygène dissous, il a aussi permis d'apprécier les contraintes et les difficultés de cette mesure.

Nous espérons que cela aidera les possesseurs d'oxymètre à mieux utiliser leur équipement de contrôle et à en tirer le meilleur parti. Quant à ceux qui n'osaient s'équiper, nous souhaitons qu'ils aient trouvé ici le moyen de tester et de choisir un oxymètre