

## SOCIÉTÉ HYDROTECHNIQUE DE FRANCE

## COMITÉ TECHNIQUE

Session n° 117

## Discussions

## • Séance du mercredi 18 mars – Matin

Discussion de la Communication de M. A. GOUBET : *Les petites installations hydroélectriques dans les pays industrialisés.*

M. GOUBET fait son exposé.

M. le Président. – Merci M. GOUBET de votre communication qui a mis en évidence un certain nombre de choses tout à fait intéressantes et originales. Vous avez visiblement fort intéressé l'auditoire.

M. FAUCONNIER (S.G.T.). – M. GOUBET a essayé de comparer la situation française à la situation d'autres pays industrialisés où il semble que la statistique dont il a parlé à la fin de sa communication ne donnerait pas les mêmes résultats : il semble qu'il y ait une croissance différente dans des pays comme le Japon, les Etats-Unis, les pays nordiques. . .

M. GOUBET. – La situation peut être sensiblement différente d'un pays à l'autre.

Par exemple la Suisse n'a pratiquement jamais eu recours aux combustibles fossiles pour produire de l'électricité ; normalement les prix de l'électricité n'ont donc pas dû être directement influencés par la "crise énergétique".

Au Japon, au contraire beaucoup de centrales utilisent le fuel ou le gaz et certaines îles n'ont aucune centrale nucléaire ; l'intérêt de l'hydraulique a donc augmenté au cours des dernières années davantage qu'en France Continentale.

Les Etats-Unis, de leur côté, portent un grand intérêt à ce qu'ils appellent la "petite hydraulique". Mais il s'agit en fait d'aménagements de 10 à 15 000 kW qui ne mériteraient pas ce nom chez nous.

En Suède, la situation est encore différente. C'est actuellement le pays qui a le plus important pourcentage de production nucléaire, mais en même temps c'est un pays où ce nucléaire est mal vu et l'on souhaite théoriquement qu'il disparaisse assez rapidement. L'intérêt de l'hydraulique doit donc s'apprécier non par rapport au nucléaire comme en France, mais par rapport à autre chose. . . qui n'est pas encore défini. Il est très possible que les aménagements hydroélectriques soient dans ce pays particulièrement intéressants.

J'ai insisté sur le cas français parce que je pense qu'il vous intéresse davantage ; mais les situations peuvent être très diverses à travers le monde.

M. VANDAME

1) Il me semble que l'aspect économique prédominant des micro-centrales est le prix de revient du kW installé : selon que l'équipement de 1 kW revient à 3 000 F, 5 000 F ou 10 000 F, les choses changent totalement de nature. Au-dessous de 5 000 F/1 kW les équipements projetés par les producteurs autonomes devraient être autorisés avec plus de facilités par les différents services administratifs. Ceci concerne les projets entre 500 kW et 8 000 kW.

2) Actuellement, même les dossiers de demandes de Règlement d'Eau (< 4 500 kW) sont étudiés, bien plus dans un esprit de discussion et d'obstruction, qu'en vue d'aboutir à la délivrance de l'autorisation, dans un délai raisonnable, quand bien même ce projet ne soulève pas de difficultés particulières.

M. GOUBET. – Il est certain que les procédures de concession ont toujours été lourdes. Mais il existe aujourd'hui un souci accru de prendre en considération les intérêts des différentes parties prenantes, et notamment les intérêts de l'environnement, qui ne peut qu'alourdir encore les procédures. En essayant tout

à l'heure d'évaluer l'évolution entre 1973 et 1981 de l'intérêt d'un aménagement hydroélectrique j'ai insisté sur ce souci de l'environnement qui est de nature à empêcher aujourd'hui la réalisation d'aménagements qu'on aurait pu réaliser il y a 10 ans.

M. SAVARY. – J'ai été confronté à un projet qui visait à l'utilisation de chutes hydrauliques pour faire de la chaleur à des fins agricoles (chauffage de serres) sans passage par l'électricité. Faut-il prendre au sérieux de telles propositions. (1 mégawatt par hectare de serre chauffée).

M. GOUBET. – Personnellement je n'en sais rien ; mais peut-être les industriels présents pourraient-ils répondre à votre question ? Il s'agit vraisemblablement d'aménagements de petite puissance.

M. PETIT (Leroy Somer). – Nous connaissons mal le problème des grosses puissances. Par contre, en petites puissances nous avons réalisé des opérations un peu particulières qui consistent à coupler une minicentrale avec une pompe à chaleur. C'est un projet intéressant qui dans les prochaines années devrait se développer.

Nos installations consistaient à entraîner le compresseur de la pompe à chaleur électriquement. Par contre, on peut aussi envisager de l'entraîner directement par la turbine (je crois qu'en ce dernier domaine il y a eu quelques réalisations en France).

Sinon, nous croyons que dans les pays en voie de développement l'utilisation de petites chutes d'eau en énergie mécanique directe est certainement une des voies de développement importantes. Nous pensons utile de ne pas se limiter à la seule production d'électricité.

M. le Président. – Oui. . . d'ailleurs la communication écrite de M. GOUBET a fait référence à l'état de l'hydraulique à la fin du premier millénaire où de nombreuses installations existaient qui utilisaient directement l'énergie hydraulique à des fins mécaniques. Nous en revenons un peu au meunier d'antan.

M. BONNET (BRGM). – Je voudrais présenter un commentaire sur la rentabilité qui a trait, indirectement, à la rentabilité des microcentrales.

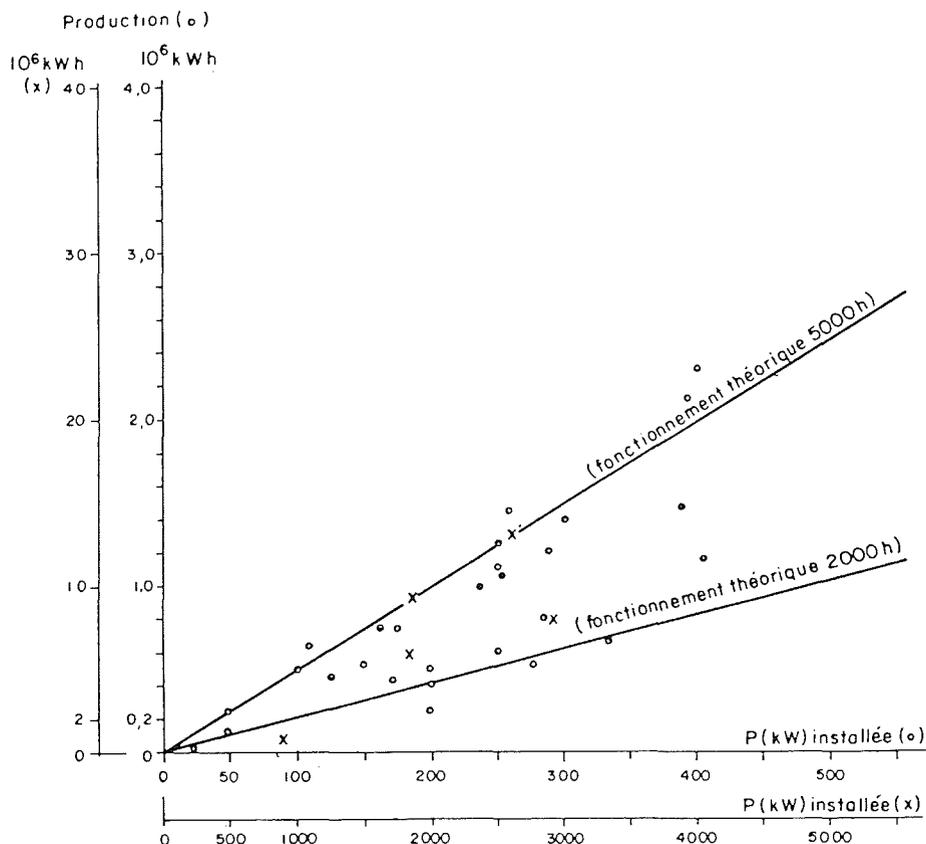
Un certain nombre d'auteurs du BRGM, dans un ouvrage qui va paraître prochainement, examinent le problème du nombre d'heures, et donc du fonctionnement hydrologique, nécessaires pour rentabiliser une centrale.

Ils ont pour ceci confronté les productions obtenues et les nombres d'heures de fonctionnement, ainsi que les puissances installées, d'un certain nombre de centrales qui existent actuellement dans nos régions et qui peuvent être considérées comme rentables puisqu'elles continuent à fonctionner.

Voici la courbe obtenue figure ci-jointe. On voit en abscisses les puissances installées, et en ordonnées les productions en kWh vendus.

On constate une règle empirique bien connue, à savoir qu'en-dessous d'un fonctionnement de 2 000 heures par an il n'y a plus de rentabilité puisque pratiquement on ne trouve pas d'installation dont le point représentatif suit en-dessous de la courbe théorique à 2 000 heures.

On retrouve aussi une autre règle empirique plus ou moins connue, qui est que l'idéal serait d'avoir un fonctionnement théorique sur 5 000 heures. Mais on voit que ce fonctionnement



Productions moyennes des installations rentables existantes (Données recueillies sur Massif Central – Aquitaine – Pyrénées).

qui est souvent pris comme règle pour une décision est l'enveloppe supérieure du nuage de points, c'est-à-dire que c'est un objectif assez difficile à atteindre.

Ainsi on peut admettre que les potentialités hydrauliques de la plupart des projets microcentrales sont *généralement surestimées* par méconnaissance des débits, par construction d'un projet sur des séries hydrologiques trop courtes ou non représentatives du bassin versant. Il faut rappeler à ce sujet qu'une mesure journalière de débit pendant une année représente moins de 0,7 % du coût d'investissements d'une microcentrale et que ces mesures permettent par des méthodes d'extension de données, d'obtenir l'évaluation précise des potentialités hydrauliques d'un site (voir chapitre II de l'ouvrage cité).

*Un auditeur.* – Pouvez-vous donner les références de l'ouvrage.

*M. BONNET.* – Les microcentrales hydroélectriques de MM. LE NIR, L. MONITION et J. ROUX, qui sera édité chez Masson.

*M. le Président.* – Merci beaucoup. C'était là une intéressante communication plutôt qu'une question.

*M. BORDES (C.G.E.).* – Je voudrais poser une question en matière d'évolution des tarifs, dans ce cas, par EDF.

Vous indiquez qu'au cours des dernières années, grosso modo, les tarifs d'hiver ont augmenté 2 fois plus vite que les tarifs d'été.

Est-ce que vous pouvez préciser si cette évolution va continuer ? et encore combien de temps ?

*M. GOUBET.* – Cette évolution va encore nécessairement continuer. La presse a fait état de nouveaux tarifs étudiés actuellement par EDF et l'Administration, et qui pourraient correspondre à la situation de l'horizon 1985. Dans ces tarifs, manifestement les prix d'été seront beaucoup plus bas qu'actuellement en valeur relative, et les prix d'hiver un peu plus haut éventuellement. L'écart va donc se creuser.

Un aménagement hydraulique alpin non régularisé où l'essentiel de l'énergie apparaîtrait en juin ou juillet, à la fonte des

neiges, perdra une bonne partie de son intérêt par rapport à la situation actuelle et encore plus par rapport à la situation d'il y a 5 ans.

*M. CHEVALIER.* – La nouvelle réglementation en vigueur pour les mini-centrales autonomes fait elle déjà sentir ses effets ? L'Administration voit-elle une augmentation du nombre de ses dossiers ? Les procédures autonomes vont-ils un raccourcissement des procédures actuelles quand ils visent des projets qui tomberont dans la bonne fourchette de puissance ?

*M. VANDAME.* – Non, personnellement je n'ai pas constaté tellement de différence. Les dossiers de concession sont des dossiers difficiles.

Dans le passé je m'étais limité à des dossiers de 500 kW ; et comme beaucoup de confrères je commettais le péché d'équiper un peu plus. Ce péché va diminuer puisque je suis autorisé maintenant jusqu'à 4 500 kW... mais l'étude des dossiers n'est pas plus rapide, à mon sens, pour autant.

Puisque j'ai la parole je voudrais faire la remarque suivante : je suis étonné du creusement de l'écart entre les prix d'été et les prix d'hiver.

Il me semble qu'en France il y a 40 millions ou 45 millions de kW installés. Si la production EDF est de l'ordre de 250 milliards, cela veut dire que les machines EDF tournent en moyenne 5 000 heures/an, donc les 2/3 du temps.

Si le potentiel mécanique EDF tourne aussi longtemps c'est-à-dire autour de 5 000 heures – et non pas 2 000 ou 2 500 heures comme autour des années 1950 – je suis étonné de ce creusement.

*M. GOUBET.* – Sur la première remarque relative à l'afflux éventuel de projets de moins de 500 kW, personne ne peut vous répondre puisqu'il y a 200 Services dans les différentes Administrations de l'Etat susceptibles, au moins en théorie, de recevoir les demandes et de les instruire de façon décentralisée.

En ce qui concerne par contre des projets plus importants, compris entre 500 et 4 500 kW, je puis préciser que ceux dont l'instruction était assez avancée en juillet dernier continuent à

être instruits selon les errements anciens, de manière à ne pas avoir à répartir à zéro. Donc actuellement, sont encore accordées des concessions pour des aménagements de l'ordre de 1 000 ou 1 500 kW. On s'efforce même de clore ces dossiers rapidement pour respecter les limites de temps fixées par la réglementation.

Enfin, je n'ai pas parlé du nouveau régime d'autorisation parce que le décret en cours d'étude n'est pas encore sorti. Je n'ai pas non plus voulu analyser le texte ancien qui risque d'être rapidement périmé. Mais il est certain que dans ce nouveau décret on verra apparaître le souci accru des Pouvoirs publics pour la protection de l'environnement... et ce souci n'est pas de nature à accélérer les procédures ; il n'est pas de nature non plus à faciliter et à rentabiliser davantage les aménagements susceptibles d'être envisagés.

En ce qui concerne la seconde remarque (différence entre prix d'été et prix d'hiver de l'électricité) la réponse détaillée serait assez complexe. On peut indiquer sommairement qu'actuellement 35 % de notre énergie sont fournis par le nucléaire. Avec l'apparition des nouvelles centrales, à certaines heures d'été, seules tourneront pratiquement les centrales nucléaires et les centrales hydrauliques au fil de l'eau ; pendant les autres heures d'été, fonctionneront en outre des centrales au charbon. Mais dans tous les cas les moyens de production utilisés seront peu coûteux ; EDF a donc intérêt à encourager la consommation d'électricité pendant l'été. Par contre, l'hiver, la consommation d'un kWh de plus, nécessite le recours à une centrale à charbon et même, dans bien des cas, à une centrale à fuel. Ces moyens de production sont donc sensiblement plus coûteux.

Au contraire, en 1970 tout au long de l'année on avait recours aux centrales à charbon ou à fuel. Le coût de ces deux moyens de production était assez voisin d'ailleurs. A ce moment-là, tout au plus, utilisait-on en été des centrales plus modernes et un peu moins coûteuses que l'hiver et ces différences limitées se traduisaient par des écarts de prix plus réduits que ceux qu'on va constater à l'avenir.

*M. le Président.* — Merci, M. GOUBET.

Je crois d'ailleurs que les questions qui ont été posées balayent la totalité de l'exposé de M. GOUBET ; et par conséquent, puisque personne ne semble souhaiter prolonger la discussion, nous allons arrêter là cet échange de vues. Nous remercions vivement M. GOUBET de sa contribution.

**Discussion de la communication de M. J. FRANCOU :** *Les petites installations hydroélectriques dans les pays en voie de développement*

*M. FRANCOU* fait son exposé

*M. le Président.* — Je pense que vous avez tous été intéressés très vivement par cette communication qui se trouve axée sur un sujet particulièrement d'actualité puisqu'à la fois l'hydroélectrique et les pays en voie de développement sont très souvent l'objet de nos préoccupations.

L'environnement économique et aussi pratique de ces installations se situe naturellement dans une gamme complètement à l'opposé de celle que nous avons explorée sur les pas de M. GOUBET.

On reconnaît dans l'exposé de M. FRANCOU à la fois la compétence qui lui a permis de situer les questions économiques d'ensemble dans ce sujet assez spécifique, et également l'intervention de l'homme de terrain, celui qui a vécu beaucoup des problèmes dont vous nous entretenez. Il nous a fait bénéficier de son expérience de façon particulièrement précieuse.

J'ouvre maintenant la discussion.

*M. BONADE.* — Il nous est arrivé de rencontrer des experts de DAFECO. J'aimerais savoir quelle est la mission spécifique de DAFECO en ce qui concerne ces petites centrales, et quelle organisation DAFECO envisage pour la réalisation de cette mission.

Deuxième question : elle concerne le problème du transport de l'énergie.

Vous avez parlé de distances de 10 à 20 km. A 150 francs le mètre, la ligne coûte 1 500 000 francs. N'est-ce pas prohibitif ? Existe-il des solutions économiques pour le transport des petites puissances ?

*M. FRANCOU.* — Je rappelle quelle est l'organisation de DAFECO pour ce genre de mission concernant la mini-hydraulique.

DAFECO n'a pas d'organisation spéciale à cet effet, et ce genre de mission rentre dans sa vocation globale qui est de répondre aux questions qui lui sont posées par les pays demandeurs.

Jusqu'à présent il est certain qu'on ne nous a pas beaucoup questionné sur la mini-hydraulique et chaque distributeur d'électricité a semblé jusqu'à maintenant plus intéressé par l'entreprise d'un ouvrage plus important que celui du voisin. Mais je dois dire que depuis 2 ou 3 ans les questions effectivement affluent.

DAFECO, comme vous le savez, doit fonctionner "sans bénéfice ni perte" et nous ne pouvons donc partir en mission que lorsqu'on nous l'a demandé et que nous sommes rémunérés.

Ceci explique probablement que nous n'ayons pas beaucoup de réalisations de mini-centrales à notre actif : nous en avons installé tout de même 3 ou 4 il y a quelque temps de cela ; et nous sommes tout disposés à faire les études voulues pour en installer bien d'autres. Encore faut-il que ce soit demandé par les pays intéressés, ou par un bailleur de fonds... Je pense que dans ce cas-là la Caisse Centrale serait particulièrement désignée pour promouvoir cette recherche qui, comme je l'ai dit dans ma conclusion, est intéressante à tous les titres, non seulement économique mais humain. J'espère avoir ainsi répondu à la première question.

Votre deuxième question concerne le transport de l'énergie.

Bien entendu, là encore M. GOUBET aurait raison de dire qu'il faut d'abord situer l'ordre de grandeur de la puissance à transporter. Si l'on voulait transporter 10 kW à 20 km, je pense que cela deviendrait prohibitif... bien qu'il faille se souvenir que ce qui a déclenché la révolution hydro-électrique, c'est tout de même l'expérience d'Aristide Bergès qui, au voisinage de Grenoble, a transporté 5 kW sur 20 km.

Nous parlons de pays en voie de développement, et peut-être faudrait-il, là aussi, commencer par le commencement.

Ceci dit, je ne peux pas répondre de façon précise à votre question. Il faudrait pour cela avoir un abaque que j'ai bien l'intention de demander d'ailleurs à mes collègues électriciens... un abaque dans lequel vous auriez en abscisses la puissance à transporter et en ordonnées la distance de transport. On pourra connaître les limites admissibles de transport étant donné le coût de la minicentrale envisagée.

C'est un abaque simple à concevoir, mais très difficile à réaliser parce que les prix ne sont pas si certains que cela.

Jusqu'à présent je ne les ai pas encore. Mais votre question est en effet primordiale, et l'on ne peut, sans lui avoir donné une réponse au moins approximative, entreprendre la prospection de mini-centrales hydro-électriques.

*M. BONNET.* — Vous avez justement souligné que ce qui est un point fort des mini-centrales, c'est leur faible coût d'investissement relativement aux grands projets. Et par ailleurs vous avez souligné que des réalisations organisées comme en Chine sont susceptibles d'abaisser encore considérablement le prix de revient des installations unitaires.

Ma question est donc celle-ci : est-ce que vous pensez que dans les pays en voie de développement il est possible d'envisager que soient organisés des plans de réalisation ? Est-ce techniquement possible à votre avis ? et est-ce que "politiquement" l'on constate une prise de conscience des autorités des pays dans lesquels vous opérez dans ce sens ?

*M. FRANCOU.* — J'ai peur que vous m'en demandiez beaucoup !

Je rectifie quelque chose à propos du prix de l'énergie. Il est certain que les microcentrales coûtent beaucoup moins cher en valeur absolue que l'aménagement du Grand Inga par exemple ; mais il est certain aussi que le kilowatt installé des miniréalisations coûte énormément plus cher que celui du colossal aménagement. La fourchette est considérable : cela va de 1 à 60.

Ceci n'empêche que, les deux choses visant des objectifs complètement différents, la réalisation du Grand INGA et la réalisation d'une microcentrale de 20 kW peuvent être l'une et l'autre des opérations très intéressantes.

Pour ce qui est de la prise en charge par les pays en voie de développement d'un plan qui viserait, comme en Chine,

à officialiser cette promotion du pays par la mini-hydraulique, je précise tout de suite que je ne connais pas le monde entier... mais, pour les pays que je connais, je vois cela comme parfaitement irréaliste et irréalisable. Par contre, dans certains pays — je pense spécialement à l'Amérique latine — il y a des précédents remarquables, et l'on trouve dans la forêt amazonienne des vestiges de scieries hydrauliques qui datent de plus d'un siècle sans doute et qui sont des merveilles de l'art de construire dans notre domaine ne l'hydraulique... C'est de l'hydro-mécanique, pas de l'hydroélectricité, mais ce sont des merveilles. Par conséquent, il y a des gens qui sont des ingénieurs nés, et qui sans avoir jamais fréquenté une Faculté ou une école spécialisée sont capable de réalisations remarquables.

Je crois que la réponse à votre question ne peut être que très nuancée. A chacun sa vocation : celle des pays africains, celle des pays asiatiques ou celle de certains pays d'Amérique latine ne sont pas du tout les mêmes. Enfin, pour ce qui est des pays que je connais, essentiellement en Afrique, il me semble que la solution peut être celle que j'évoquais tout à l'heure : il faudrait obtenir du pays receveur — et ce n'est déjà pas si facile que cela — qu'il prenne lui-même en charge, avec un minimum d'intervention extérieure, la réalisation du génie civil et il recevra du matériel fabriqué par les pays hautement industrialisés. Ce matériel existe : on est en train de le commercialiser.

*M. BONNET.* — C'est ce dernier commentaire qui avait attiré ma question.

Pour m'être penché sur le problème, je pense pouvoir dire que ce ne serait vraiment efficace que si les pays développés en question pouvaient intervenir à une certaine échelle parce qu'envoyer des équipes de spécialistes ou même des matériels pour réaliser quelques unités par ci par là me semble difficilement réaliste de notre point de vue (je me place du point de vue des pays exportateurs).

*M. FRANCOU.* — Vous avez raison. Cela rejoint la question posée par l'intervenant précédent. Autant en France, il est facile de prendre sa canne pour aller regarder un vieux moulin, et voir si l'on peut y installer un groupe, autant en Afrique c'est difficile... le problème est bien là.

*M. JEANNE.* — Je me permets de faire une petite remarque.

Il y a des pays en Afrique et notamment à Madagascar où des programmes d'aménagement régional intégré reposent sur l'utilisation partielle ou totale d'énergie provenant de micro-centrales de faible puissance. Les équipements proposés par les pays occidentaux ne sont pas concurrentiels quant à leur coût comparés à ceux provenant des pays de l'Est ou du Sud-Est Asiatique.

Deux questions viennent à l'esprit :

— Pourquoi les fabricants occidentaux sont-ils si chers ? (la fiabilité du matériel proposé n'explique pas totalement les différences de coût qui sont dans des rapports allant de 1 à 10).

— Ne peut-on pas concevoir un génie civil standard qui puisse s'adapter aux nombreux modèles existants au monde ? (si un pays ou une collectivité responsable commet une erreur dans le choix d'un matériel, celle-ci pourrait être alors réparée à moindre frais sans qu'elle puisse remettre en cause la poursuite d'un programme d'équipement en ne remplaçant que les groupes hors d'usage par un matériel offrant une meilleure garantie).

*M. ETIENNE.* — Je profite de cette question pour faire une remarque qui rejoint les deux exposés :

L'exportation est liée aussi à l'expérience acquise par les constructeurs sur le marché local.

Dans la mesure où il existe un marché de micro-centrales en France les constructeurs peuvent avoir une base, et une formation pour pouvoir exporter sinon les pays qui ont beaucoup réalisé de micro-centrales chez eux leur raviront les commandes. Donc quand on parle de l'intérêt économique des micro-centrales il faut aussi prendre en compte la part de travail d'exportation qui peut être procurée dans la mesure où il existe un marché national.

*M. LE BRUN.* — Une difficulté importante de l'exportation de micro-centrales provient du fait que les clients demandent en général, du "clé en main".

Fréquemment, pour les centrales hydroélectriques de petite ou moyenne puissance, ils s'adressent directement au fabricant

de turbine, dont le matériel ne représente pourtant qu'une faible part de l'investissement global. Celui-ci doit alors fournir des prestations : préétudes, proposition de matériels hors de sa fabrication, etc., qui peuvent dépasser sa compétence lorsqu'il s'agit d'exportation.

*M. ALIN.* — Les contacts que nous pouvons avoir avec de nombreux pays africains montrent que si l'on veut pouvoir faire quelque chose d'efficace au plan commercial concernant les ventes d'équipement, il faut bien sûr comme l'a souligné le représentant du BRGM, commencer par la prospection.

Mais, en général, nos interlocuteurs ne voient pas l'intérêt d'une prospection d'ensemble. Ils ont, comme le soulignait M. FRANCOU des problèmes particuliers à résoudre : un îlot ou une petite zone où un développement est possible. Il demandent que soit trouvé au voisinage et pour un prix restant dans les limites de leurs possibilités financières, un équipement à réaliser qui permette de satisfaire les besoins à moyen terme.

C'est le premier problème qui se situe au niveau de la prospection.

Une seconde difficulté comme le soulignait le représentant des Ateliers Bouvier, intervient au niveau des équipements. A ce niveau, nos interlocuteurs prennent une position très claire dont il faut que les industriels français aient parfaitement conscience. Nous devons savoir que nous avons des concurrents qui présentent pour pratiquement tous types d'équipements, des packages complets allant de la turbine à la chaîne d'ancrage du premier support de la ligne évacuant l'énergie. Ce package intègre non seulement la turbine, le générateur, les ensembles de régulation, mais également la partie poste électrique.

Ainsi, au niveau ingénierie, la question posée est la suivante :

Première étape, regarder les sites équipables autour de telle ville dans telle zone ; deuxième étape, avec un génie civil aussi restreint que possible (éventuellement limité à une prise d'eau), proposez-nous un équipement clés en main existant sur catalogue constructeurs.

*M. FRANCOU.* — Je ferai remarquer à M. ALIN que nous sommes dans le domaine de l'hydraulique et qu'il n'y a pas moyen — les gens qui disent le contraire ne sont pas sérieux — de dire "ça correspond au numéro tant de notre catalogue". Il faudra toujours établir un projet. Il ne faut pas oublier la réalité tout de même.

Vous dites : il faut que le génie civil soit aussi réduit que possible, et éventuellement limité à une simple prise d'eau. Eh bien ! je regrette ; le génie civil a son importance. Comme on le disait tout à l'heure, la turbine est une toute petite partie de l'installation.

Or, bien des clients viennent trouver les fabricants de turbines — qui n'en peuvent mais — et leur disent : je veux de l'électricité, cela se produit avec une turbine, combien me vendez-vous tout le nécessaire ?

Eh bien ! non, l'énergie se crée avec du génie civil avant tout. Je reconnais qu'il peut y avoir beaucoup de choses dans le package, mais il ne peut pas y avoir le génie civil. Or le génie civil représente 60 %, quand ce n'est pas 85 % de l'affaire.

*M. TRANAIN.* — Je m'associe à la dernière remarque de M. FRANCOU attirant l'attention sur le coût global.

Dans les aménagements de micro-centrales, destinés à l'électrification de Centres ruraux Outre-Mer, on exige bien souvent des puissances garanties. En conséquence, les équipements électromécaniques doivent être doublés, ce qui augmente considérablement le montant de l'investissement.

Il faut donc rechercher des groupes de petite puissance, fiables et peu coûteux de façon que dans chaque unité on puisse envisager d'en placer deux ou trois.

*M. le Président.* — A mon vif regret je suis obligé d'arrêter maintenant la discussion.

Je remercie vivement M. FRANCOU. Je n'ajouterai pas d'autres commentaires à ceux de la salle : ils ont été assez éloquents et nombreux pour prouver tout l'intérêt de la communication. Nous remercions encore une fois M. FRANCOU.

Discussion de la Communications de MM. Ph. ROUSSEL et R. CUIINAT : *Environnement et petites usines hydroélectriques.*

*M. ROUSSEL* fait son exposé.

*M. le Président.* — Merci beaucoup, M. ROUSSEL, de votre exposé très vivant.

*M. ETIENNE.* — Je voudrais remercier M. ROUSSEL d'avoir posé calmement ces questions qui provoquent souvent des tensions importantes. Je le remercie notamment d'avoir souligné que, dans le cas des basses chutes, les problèmes étaient relativement limités.

J'en arrive à ma question : compte tenu de la nouvelle réglementation qui se met en place, peut-on penser que l'action de défense de l'environnement s'exercera plus localement c'est-à-dire que les sites seront plus visités, et que les réunions ou rencontres sur le lieu de réalisation auront priorité sur l'établissement des dossiers ?

Pour le moment et malgré la nouvelle législation, les personnes que j'ai pu rencontrer et qui ont des projets, envisagent des dépenses préliminaires très importantes sous forme de dossiers.

*M. ROUSSEL.* — La nouvelle réglementation est basée sur deux principes :

— une déconcentration de la décision : le Préfet a tout pouvoir pour décider d'accorder ou de refuser les autorisations ; l'arbitrage à un niveau supérieur en cas de litige devant être exceptionnel.

— une simplification des procédures qui doit permettre une limitation du volume de documents à fournir et des rapports plus faciles entre pétitionnaires et services instructeurs qui seront tous des services locaux.

*M. TRANAIN.* — Je voudrais attirer l'attention sur le cas très courant des anciennes installations que nos ancêtres avaient équipées et qui sont tombées en désuétude.

Il y a certainement intérêt à encourager la rénovation de ces installations pour amener leurs propriétaires à entretenir de nouveau le cours des canaux et rivières qui sont actuellement dans un état lamentable.

Je pense que si l'environnement a parfois à souffrir des projets de microcentrales, il en tire aussi des bénéfices.

Je voudrais souligner à cette occasion l'action engagée par le Syndicat d'électrification du Département de l'Aube, qui a entrepris des actions de rénovation d'un certain nombre d'établisse-

ments anciens, actuellement désaffectés. Merci.

*M. ROUSSEL.* — Je ne pense pas qu'il y ait de réponse à faire.

En fait, dès lors qu'il y a une autorisation, en général les autorisations données le sont pour une durée relativement longue. . . 75 ans ou 99 ans. . . avec des possibilités relativement simples de renouvellement. La remise en état ne pose aucun problème au niveau de la personne qui possède l'installation à remettre en état. . . sous réserve qu'elle ne modifie pas les termes de l'autorisation.

La réglementation en cours prévoit bien que dès lors qu'on modifie les installations ou qu'on augmente la puissance, on sera obligé de passer à nouveau par une instruction réglementaire.

*M. BONAQUE.* — Comment est perçu au niveau du Ministère de l'Environnement l'impact des microcentrales sur les phénomènes de transport solide ? (réduction du charriage et donc des possibilités d'extraction, libération brutale de quantités importantes de sédiments, parfois fort dommageable pour la faune et la flore de cours d'eau).

*M. ROUSSEL.* — Je n'ai pas parlé de ce type de conséquences, parce qu'au niveau des microcentrales électriques, les retenues d'importance suffisante pour provoquer les phénomènes dont vous parlez sont tout à fait exceptionnelles.

Mais il est évident que le problème de la modification des qualités physico-chimiques du milieu hydrobiologique dans les grandes retenues est très important. Des études spécifiques ont été faites ; mais, à ma connaissance, on n'en a pas tiré des règles générales, et je ne crois pas qu'on en tirera jamais. Encore une fois, pour tous ces aménagements microélectriques, la philosophie que je me suis faite peut être corrigée par d'autres interprétations ; il y a beaucoup de cas d'espèce, et l'on peut très difficilement dégager des règles générales.

*M. le Président.* — Je voudrais remercier encore une fois non seulement notre dernier conférencier, mais aussi ceux qui l'ont précédé, et tous ceux qui ont bien voulu prendre part à la discussion. En tant que président de séance, je vous sais beaucoup gré de m'avoir rendu la tâche très facile et très agréable.

## • Séance du mercredi 18 mars — Après-midi

Discussion de la communication de M. Ch. PETIT : *Microcentrales hydroélectriques d'une puissance inférieure à 100 kW.*

*M. PETIT* fait son exposé.

*M. le Président.* — Merci M. PETIT. Vous avez utilisé intégralement le temps qui vous était imparti ; je vous fais un tout petit reproche : j'aurais souhaité entendre de votre bouche quelques données sur les prix de revient d'investissement ; mais peut-être y aura-t-il des questions qui vont venir de la salle à ce sujet.

*M. BONNIN.* — L'absence de distributeur pose un problème de moment cinétique de l'eau à la sortie.

Quelle est son incidence sur le rendement de la machine ?

*M. PETIT.* — Le groupe HYDROLEC forme un ensemble hydraulique complet et cohérent dont le brevet a d'ailleurs été déposé.

La conception générale du groupe et en particulier de la turbine permet de se passer d'un distributeur sans pertes de rendement importantes. Or la suppression du distributeur permet une économie, mais surtout fait disparaître le problème bien connu d'encrassement de cette pièce. Ce point est pour nous essentiel dans la logique de conception du produit. Je vais essayer de répondre sur les prix avant que la question ne soit posée ; ce point intéresse tout le monde.

Pour la France, une minicentrale du type H basse chute, c'est-à-dire le groupe hydroélectrique et son appareillage électrique complet, a un prix, départ usine qui se situe entre 2 000 francs et 10 000 francs par kW.

Plus la puissance augmente et plus la chute augmente, plus le prix au kW est faible.

A titre d'exemple, un type H6 15 kW vaut environ 80 000 F HT départ usine avec son appareillage complet.

A ce prix il faut ajouter le prix d'installation. Or ce prix est très variable d'un site à l'autre. Il entraîne un supplément de 20 à 200 %. En moyenne, il faut à peu près doubler le prix du matériel départ usine pour avoir un prix "installé". La moyenne des ventes en 1980 se situe autour de 150 000 francs par groupe pour 15 à 16 kW de puissance moyenne installée.

En série C, les groupes sont beaucoup plus économiques : une HYDROLEC série C, 15 kW vaut 60 000 francs, mais les prix d'installation sont beaucoup moins élevés. On arrive à un prix "installé" de l'ordre de 6 à 7 000 francs par kW.

*M. RABAUD.* — Je voudrais poser deux questions.

Vous avez annoncé que le débit minimum était de la moitié du débit maximum. Je trouve un peu surprenant que ce chiffre soit aussi élevé. Vous avez bien dit que c'était pour avoir un rendement de 50 %. Est-ce que vous pourriez préciser ce point ?

Pour illustrer ce que vous avez dit sur la nécessité de fiabilité, pourriez-vous nous indiquer comment vous faites vos calculs à l'emballage. Quelles sont les contraintes que vous prenez ?

*M. PETIT.* — Le débit minimum catalogué est effectivement moitié du débit nominal de la machine et à ce débit le rendement global est d'environ 50 %. Pratiquement, on peut régler le groupe jusqu'au quart du débit nominal, mais les rendements globaux deviennent trop faibles pour être catalogués. On obtient environ 20 % de rendement global au quart du débit nominal et 40 % au tiers.

L'autre question concerne l'emballage et les précautions prises pour l'éviter.

Ce type de turbine Kaplan, en basse chute, a un coefficient

d'emballage d'environ 2,5. Nos génératrices tournent, suivant les types, à 1 000 ou 1 500 tr/min. Nos groupes sont construits pour supporter cet emballage. Nous en avons fait tourner 48 heures à l'emballage sans incident.

Ce résultat est obtenu grâce à l'utilisation de génératrices asynchrones à rotor cage non bobiné ainsi qu'à la parfaite lubrification des roulements pendant l'emballage.

Les roulements traditionnels lubrifiés à la graisse souffrent au cours d'un fonctionnement prolongé à l'emballage. Nous n'avons pas ce problème puisque la génératrice est toujours pleine d'huile et les roulements sont toujours parfaitement lubrifiés.

Néanmoins, pour éviter un vieillissement prématuré du matériel, nous prévoyons toujours dans nos installations un vannage de sécurité qui coupe le débit sur détection de sur vitesse.

*M. AMESTOY.* — Vous avez insisté sur l'autonomie. Vous est-il possible de préciser davantage ce caractère d'autonomie ?

*M. PETIT.* — J'ai parlé beaucoup d'autonomie parce qu'en France, EDF n'accepte le couplage réseau qu'en moyenne tension et ceci suppose un appareillage coûteux. En pratique, il est rarement économique de revendre son courant en-dessous de 100 kW. Par conséquent, si nous voulions développer le produit en France, il fallait prévoir un fonctionnement en réseau isolé, c'est-à-dire non connecté au réseau national.

D'autre part, le marché principal des minicentrales de puissance réduite se trouve dans les pays en voie de développement. Dans ces pays, le but est d'alimenter des besoins de quelques dizaines de kW en réseau isolé. Ces contraintes nous ont donc obligés à développer un dispositif particulier pour fonctionnement autonome. Néanmoins, nos groupes ne posent aucune difficulté pour être couplés sur un réseau EDF. Il s'agit souvent de minicentrales en parallèle sur des minicentrales existantes.

*M. AMESTOY.* — Vous êtes quand même tributaire au moins d'une installation autonome elle-même, qui permet de fournir la puissance magnétique nécessaire au fonctionnement d'une génératrice asynchrone.

*M. PETIT.* — Pas du tout. Les groupes sont réellement totalement autonomes, sans apport extérieur d'énergie.

*M. AMESTOY.* — A ce moment-là, qui fournit l'énergie magnétisante ?

*M. PETIT.* — Une batterie de condensateurs aux bornes de la génératrice.

*M. AMESTOY.* — C'est suffisant pour assurer un fonctionnement électrique correct ?

*M. PETIT.* — Tout à fait. Sur charge résistive nous obtenons avec le régulateur une stabilité en tension de  $\pm 5\%$  et en fréquence de  $\pm 0,5\%$ . Comme je l'ai exposé, les seuls cas délicats correspondent au démarrage de moteurs asynchrones.

*M. AMESTOY.* — Vous pensez que c'est plus fiable que d'avoir un alternateur ?

*M. PETIT.* — Oui, absolument.

La roue polaire bobinée et les cellules tournantes rendent l'alternateur plus fragile qu'une génératrice asynchrone, surtout à l'emballage, c'est cela qui nous a conduit à développer ce système.

Nous avons plus de 200 installations complètement isolées qui fonctionnent en France et je ne souhaite qu'une chose, c'est de pouvoir vous en montrer une.

*M. le Président.* — J'espère que M. AMESTOY profitera de l'invitation. M. PETIT propose d'organiser une réunion sur un site pour les personnes qui seraient particulièrement intéressées ; je crois qu'il faut profiter de l'invitation.

Je voudrais moi-même poser une question. Dans le premier graphique présenté, qui donne la plage de fonctionnement des machines H et C, apparaît un trou entre  $H_4$  et  $H_6$ . Est-ce que cela résulte de l'expérience ou de calculs ?

*M. PETIT.* — Le "trou" dont vous parlez correspond à un écart de débit d'une centaine de litres par seconde. Or le débit des rivières varie sans cesse et le débit optimum d'équipement est rarement déterminé à 100 l/s près. En pratique, ce "trou" n'est pas très gênant. Nous prévoyons néanmoins de le combler dans les gammes futures.

*M. le Président.* — Il nous faut remercier sincèrement nos collègues de Leroy-Somer de cet exposé complet et vraiment

nouveau pour la plupart d'entre nous. J'espère que nous aurons l'occasion et le plaisir de vous revoir en d'autres occasions, M. PETIT. Merci encore.

**Discussion de la communication de MM. J.P. ROUYER et C. LE PLOMB : Récupération d'énergie hydraulique : petites installations d'énergie associées à de grands projets hydrauliques.**

*MM. ROUYER et LE PLOMB* font leurs exposés.

*M. le Président.* — Je remercie M. ROUYER et M. LE PLOMB. J'espère qu'à la suite de ces exemples fort variés qui nous ont été présentés d'une part par nos collègues de la Production hydraulique à EDF, d'autre part par la Compagnie Nationale du Rhône, les questions vont fuser de la salle.

*M. HALFTERMEYER.* — Je m'adresse particulièrement à M. ROUYER :

Un impératif essentiel des microcentrales doit être la simplicité de la conception et de la fabrication, tout en conservant une bonne fiabilité.

Les cahiers des charges EDF concernant les alternateurs hydrauliques ne semblent pas adaptés aux machines de faible puissance, au vu du volume de la documentation et de certaines impositions techniques.

Un cahier des charges simplifié est-il prévu par EDF ?

*M. le Président.* — Votre question me semble tout à fait pertinente. Je vais demander à M. RABAUD qui dirige la Division "Matériel" à la Production hydraulique de bien vouloir apporter des éléments de réponse.

*M. RABAUD.* — C'est une question qui nous a été souvent posée. Il y a effectivement des cahiers des charges simplifiés pour petites machines.

Ces cahiers des charges indiquent des fonctions générales à satisfaire et des contraintes à prendre en compte dans le calcul (emballage, durée d'emballage, calcul des paliers, etc.) plutôt que de donner des caractéristiques détaillées. Cela allège beaucoup le volume de papier.

Je ne suis pas sûr que cela allège beaucoup le travail technique du constructeur au niveau de la conception et du calcul ; mais c'est un allègement au niveau des appels d'offres et des réponses au cahier des charges.

*M. le Président.* — Je pense que si le représentant de Jeumont-Schneider veut davantage d'informations il pourra entrer en contact avec vous en dehors de la réunion.

Personne ne demande la parole sur ces exemples de groupes de restitution et sur les projets qui ont été exposés ? . . .

Dans ces conditions nous allons passer au deuxième cran de la progression géométrique que j'évoquais tout à l'heure en attaquant le créneau 100 à 1 000 kW, qui fait l'objet de la communication de M. Etienne, de la Société DUMONT, en collaboration avec M. CHADENSON de Neyrpic.

**Discussion de la communication de MM. J. ETIENNE et J. CHADENSON : Les minigroupes hydroélectriques (100 à 1 000 kW).**

*M. ETIENNE et CHADENSON* font leurs exposés.

*M. le Président.* — Merci M. ETIENNE et M. CHADENSON. Vous nous avez présenté une panoplie fort large de réalisations qui font honneur à vos établissements, et je me félicite de cette collaboration entre deux constructeurs français, en espérant que cela portera ses fruits plus tard.

En attendant je serai heureux d'entendre des questions venant des auditeurs.

*M. TRAMAIN.* — M. ETIENNE : Je note l'absence dans votre exposé des turbines classiques à axe vertical et à bache spirale. Seraient-elles condamnées ? Pour quelles raisons, en dehors du coût relativement cher du génie civil ?

*M. ETIENNE.* — Ce que j'ai voulu présenter rapidement, ce n'est pas un panorama complet de ce qui peut se faire entre 100 et 1 000 kW, ce sont surtout les réalisations originales qu'on a été amené à faire par suite de pressions extérieures, soit économiques, soit résultant du Génie Civil existant. Mais il est certain que l'on continue à faire des Kaplan à axe vertical. . . même à double réglage.

Malgré tout, très souvent les groupes ont tendance, qu'ils soient inclinés ou qu'ils soient verticaux, à devenir des groupes à distributeur fixe pour des raisons économiques car l'utilisation des petits débits d'étiage en basse chute, compte tenu du bas prix de l'énergie en été, présente moins d'intérêt, si bien qu'entre les deux types de Kaplan il y a peu de différence annuelle de recette mais il y a une différence de prix sensible sur la turbine et ses accessoires de commande.

*M. PETIT.* — Quelle est votre expérience du polyester ? Que pouvez-vous dire sur ce matériau en particulier dans les conduites et les pièces en forme ?

*M. ETIENNE.* — L'expérience du polyester en matière d'hydraulique est relativement récente. Nous avons fait, il y a environ 3 ans, une petite conduite forcée expérimentale pour une usine d'EDF dans la Haute-Loire, à 1 000 m d'altitude. C'est une conduite d'environ 800 mm de diamètre sous une chute de 20 m, exposée aux rudesses du climat de la Haute Loire pendant une bonne partie de l'année. Puis, nous avons fait des pièces de petites turbines pour des chutes plutôt basses. Mais ces pièces sont encore récentes.

Par contre, il existe des pièces en polyester exposées au grand air depuis pas mal de temps, par exemple des boîtes de matériel électrique. Bien que le produit constitutif de ces pièces contienne pas mal de charges pour en diminuer le coût, l'ensemble n'a pas mal résisté. On peut donc en augurer favorablement pour des pièces réalisées en résines pures. Le polyester a des avantages : bon état de surface dans les conduites ; en outre cet état de surface est stable dans un certain nombre d'eaux. En particulier les eaux du Massif Central et de l'Ardèche ont souvent posé des problèmes quand on a utilisé d'autres matériaux que le polyester : nos clients, pour beaucoup de conduites forcées, ne font pas des traitements de surface très appropriés ; or ces eaux entraînent la formation rapide de pustules de la taille du bout du doigt, ce qui augmente les pertes de charge ; c'est un inconvénient qu'on n'a pas avec le polyester.

*M. le Président.* — Je crois qu'en matière d'utilisation de matériaux plastiques dans les conduites nos collègues d'EDF peuvent apporter quelques informations, puisqu'il y a eu pas mal de réalisations chez eux. . .

*M. ANDRE.* — Les conduites en matière plastique utilisées dans les Alpes et les Pyrénées pour des adductions complémentaires d'eau dans les barrages donnent toute satisfaction après de nombreuses années de service. Les frottements sont faibles (coefficient de STRICKLER de l'ordre de 100 ou rugosité relative  $e/D$  très faible voisine de celle qu'on adopte pour les conduites hydrauliquement lisses) ; en outre, le poids très réduit des éléments de conduite facilite la manutention et la mise en place. Elles ne nécessitent aucun entretien. L'expérience a toutefois montré qu'il fallait prendre quelques précautions lors du transport et au cours du montage.

*M. le Président.* — Il y en a une qui a été réalisée dans le massif de Belledonne, qui fonctionne sous une pression de 10 bars et qui a été essayée aux environs de 20 bars.

*M. JACQUIOT.* — En ce qui concerne les revêtements intérieurs des conduites d'acier pour amenées d'eau vers les centrales, en général l'état du métal reste tel qu'il était à l'origine.

Mais dans certains cas d'agressivité caractérisée de l'eau véhiculée, un revêtement intérieur approprié (Epoxy, ciment, etc.) peut assurer le bon état de surface de la canalisation, avec influence favorable vis-à-vis des pertes de charge qui restent faibles dans le temps.

*M. le Président.* — Est-ce qu'il y a d'autres questions sur les dispositions techniques ou technologiques qui ont été présentées ? . . .

*M. BONAIDE.* — Ma question s'adresse à M. CHADENSON de la Sté Neyrpic : elle concerne les deux groupes qu'il nous a montrés. . . 500 kW, 10 m de chute.

Je voudrais savoir quel a été le coût de ces équipements : turbine seule, et turbine + régulation. . .

*M. CHADENSON.* — Je n'ai pas les chiffres précis en tête. Les deux turbines de Motz ont dû coûter, sans les équipements électriques, 800 000 F HT chacune.

Le prix que l'on obtient pour des chutes autour de cinq mètres se situe entre 2 500 F et 3 500 F le kW installé, pour du matériel asynchrone ; pour des turbines fonctionnant en réseau isolé, les prix sont de 30 à 40 % plus chers.

*M. le Président.* — Merci M. CHADENSON. C'était peut-être un des petits reproches que j'allais faire à nos collègues qui viennent de nous montrer une telle variété de matériels : ils ont été d'une rare discrétion en ce qui concerne le coût des aménagements qui ont été présentés.

Mais je crois qu'ils répondraient encore volontiers à d'autres questions de ce genre.

*M. DURANTON.* — Pour répondre à M. LUGIEZ au sujet des coûts, nous pouvons indiquer que le Syndicat Mixte d'Équipement du Département de l'Ardèche installe cette année sous une chute maximale de 19 mètres, 3 groupes axiaux dont 2 de 1 100 kW chacun et 1 de 300 kW, soit 2 500 kW, au total, pour un coût actuel, hors taxes tout compris en matériel d'environ 2 500 F le kW installé.

*M. le Président.* — Vous sortez sur le réseau "moyenne tension" ?

*M. DURANTON.* — Oui, en 20 kV.

*M. le Président.* — Est-ce quelqu'un souhaite encore poser des questions sur le sujet ? . . .

Discussion de la Communication de MM. J. RABAUD et G. PICOLLIER : *Les groupes pour petites centrales de production.*

*M. RABAUD et PICOLLIER* font leur exposé.

*M. le Président.* — Je remercie MM. RABAUD et PICOLLIER, Est-ce que quelqu'un souhaite poser des questions ?

*M. AMESTOY.* — Dans le domaine des Francis horizontales de petite puissance il y a une turbine qui permet de réaliser dans certains cas une installation économique. C'est la Francis double. Nous n'en avons pas vu dans les exemples que vous avez donnés.

Par contre vous avez présenté un groupe horizontal avec un alternateur et deux turbines Francis simples identiques.

Ne pensez-vous pas que c'est vraiment le cas où l'installation d'une turbine Francis double serait plus économique ?

*M. PICOLLIER.* — Effectivement, je n'en n'ai pas parlé pour gagner un peu de temps, mais il en est fait mention dans le texte.

Le choix entre FRANCIS simple, FRANCIS double et deux FRANCIS simples est conditionné par la valeur du débit d'équipement et par la plage de variations de ce débit.

L'utilisation de deux FRANCIS simples sur le même arbre permet de conserver un bon rendement lorsque le débit est divisé par 2 ou par 3, ce qui n'est pas permis avec une roue double et un seul distributeur.

Notons, toutefois, qu'il existe des FRANCIS doubles avec deux distributeurs et des diamètres différents pour chacune des roues, ce qui permet une bonne utilisation du débit, mais complique la machine.

*M. RABAUD.* — Je voudrais ajouter un complément de réponse à propos du choix entre deux FRANCIS simples ou une FRANCIS double : les FRANCIS doubles sont souvent handicapées au niveau du choix économique par le fait que les constructeurs sous-estiment assez systématiquement le rendement de ces machines, alors qu'en réalité les essais que l'on peut faire sur les FRANCIS doubles sont systématiquement meilleurs que le rendement garanti.

C'est un point sur lequel on réfléchit.

• Séance du jeudi 19 mars – Matin

Discussion de la Communication de MM. H. KELLER et A.W. SCHMITZ : *Erosion-Corrosion dans les turbines à vapeur humide. Expériences acquises et dispositions prises.*

M. KELLER fait son exposé.

M. le Président. — Je remercie doublement M. KELLER de sa prestation : d'abord je le remercie d'avoir bien voulu faire le déplacement pour venir nous exposer l'expérience de KWU sur ce sujet, et je le remercie également d'avoir fait l'effort d'avoir parlé en français : comme vous avez pu le constater, son français était parfaitement clair et compréhensible et, de plus, il était appuyé par des diapositives qui m'ont paru très claires et très explicites.

Je pense que M. KELLER a brossé l'ensemble du tableau de la situation ; mais comme les exposés qui vont suivre vont revenir sur ces différents aspects : en particulier M. LACAÏLLE va donner l'expérience d'ALSTHOM, M. GREGOIRE va parler de la chimie, enfin d'autres aspects encore seront évoqués, il n'est peut-être pas utile de poser maintenant un grand nombre de questions. Néanmoins, si quelqu'un a une ou deux questions particulières à poser à M. KELLER, il peut le faire.

Il n'y a pas de questions, ce qui ne m'étonne pas d'ailleurs, parce que l'exposé était très clair.

Discussion de la Communication de M. L. LACAÏLLE : *"Synthèse des observations recueillies en Centrale sur des circuits en vapeur humide"*.

M. LACAÏLLE fait son exposé.

M. le Président. — Je remercie M. LACAÏLLE de son exposé qui a été très complémentaire de celui de M. KELLER, parce

qu'il a abordé plus particulièrement le problème du constructeur de turbines.

Avant de revenir sur le problème des grands turbines avec M. GREGOIRE en fin de matinée, nous allons changer un peu de sujet et nous pencher sur les problèmes des pompes alimentaires présentés par M. RANDRIANARIVO.

Discussion de la Communication de M. E. RANDRIANARIVO : *Premières investigations et expérimentations sur la tenue à l'érosion-corrosion des pompes alimentaires des générateurs de vapeur.*

M. RANDRIANARIVO fait son exposé.

M. le Président remercie M. RANDRIANARIVO et propose de consacrer le temps de la discussion à l'audition de deux exposés que les circonstances n'ont pas permis d'inscrire au programme mais qui lui paraissent apporter d'intéressants compléments aux travaux déjà présentés.

C'est ainsi que M. DUCREUX et M. BOUCHACOURT (du Centre d'Essais EDF des Renardières) sont successivement invités à présenter — aussi brièvement que possible — les deux exposés intégralement reproduits ci-après :

— Effet de la chimie de l'Eau sur l'érosion-corrosion des aciers par l'eau et la vapeur humide.

— Erosion-corrosion des aciers au carbone dans la vapeur circulant à grande vitesse : étude expérimentale.

## Effet de la chimie de l'eau sur l'érosion-corrosion des aciers par l'eau et la vapeur humide

J. DUCREUX

Direction des Etudes et Recherches  
Electricité de France  
Les Renardières

### RESUME

Un modèle théorique prenant en compte la cinétique chimique est proposé pour évaluer l'influence des facteurs chimiques qui régissent l'érosion-corrosion de l'acier ordinaire. Des résultats de mesures effectuées sur boucle d'essai ou en centrale montrent nettement l'influence du conditionnement chimique de l'eau et l'influence de la composition de l'acier.

*Nota* : Cet exposé s'inspire pour un très large part du texte d'une communication préparé par Messieurs BERGE, SAINT PAUL et DUCREUX à l'occasion de l'International Conference on Water Chemistry of Nuclear Reactor Systems organisée en Octobre 1980 par la British Nuclear Energy Society.

\*

Dans les centrales thermiques de production électrique de nombreux cas de dégradation de l'acier ordinaire surviennent entre 100 et 250°C dans des écoulements d'eau ou de vapeur humide animés de grandes vitesses : lorsque l'usure n'est pas provoquée par l'impact de particules solides (abrasion) ou de gouttelettes (érosion), on a affaire à de l'érosion-corrosion.

Cet exposé aborde l'évaluation théorique et expérimentale de l'influence des facteurs chimiques qui régissent l'érosion-corrosion dans le cas de l'acier ordinaire. Cette évaluation est

particulièrement importante pour la sauvegarde d'installations où le seul paramètre que l'on puisse modifier pour réduire l'érosion-corrosion est le conditionnement chimique de l'eau.

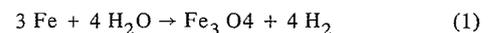
Enfin, quelques résultats obtenus sur des aciers faiblement alliés sont présentés.

### Evaluation théorique

#### Mécanismes de l'érosion-corrosion

Plusieurs processus physicochimiques s'enchaînent pour produire l'érosion-corrosion :

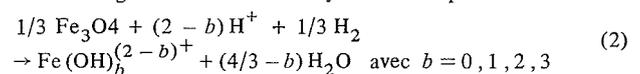
1) *Oxydation de l'acier* avec formation d'une couche de magnétite :



2) *Formation de fer ferreux soluble* en quantités approximativement égales par deux processus distincts :

a) Formation directe de fer ferreux à partir du métal en même temps que se produit l'oxydation ;

b) Réduction de la magnétite en fer ferreux en présence d'hydrogène. En régime établi (vitesse de corrosion constante dans le temps) les vitesses de production et de réduction de la magnétite sont égales : la couche d'oxyde reste d'épaisseur constante.



Dans des conditions physicochimiques données une seule de ces réactions est prépondérante ; en supposant l'ordre de la réaction de réduction égale à  $n$ , la vitesse surfacique de corrosion  $dm/dt$  peut être évaluée :

$$\frac{dm}{dt} = 2K (Ceq^n - C^n) \quad (3)$$

avec

$K$  coefficient de cinétique chimique fixé par les conditions physiques.

$C_{eq}$  et  $C$  respectivement les concentrations en fer ferreux à l'équilibre, et à la paroi.

3) Le dernier processus à prendre en compte est la *diffusion du fer soluble* de la paroi vers le fluide sous l'effet de l'écoulement (il peut s'agir de convection dans un liquide ou de renouvellement du film liquide de paroi dans un écoulement de vapeur humide). Si  $\lambda$  est le coefficient de transfert de masse, le flux de fer ferreux transféré de masse, le flux de fer ferreux transporté par suite de la corrosion vaut :

$$\frac{dm}{dt} = \lambda(C - C_0) \quad (4)$$

avec  $C_0$  concentration en fer ferreux dans l'écoulement.

L'élimination de la concentration de paroi  $C$  entre les équation (3) et (4) fournit la loi de corrosion  $dm/dt$  en fonction de la concentration  $C_{eq}$ .

Pour un ordre de réaction de réduction égal à 1 le résultat est simple :

$$\frac{dm}{dt} = \frac{2K\lambda}{2K + \lambda} (C_{eq} - C_0) \quad (5)$$

Pour des réactions d'ordre supérieur (2 ou 3) le résultat est donné sous forme graphique (Fig. 1).

Dans la suite, en attendant le verdict expérimental, nous supposons l'ordre  $n$  égal à l'unité.

Rôle du pH

La valeur de la concentration en fer soluble à l'équilibre est fixée par la loi d'action de masse :

$$C_{eq} = (H_2)^{1/3} [K_1 (H^+)^2 + K_2(H^+) + K_3 + K_4/(H^+)] \quad (6)$$

avec

$(H^+)$  concentration en ion hydrogène

$(H_2)$  concentration en hydrogène gazeux dissous

Les constantes nécessaires au calcul ont été déterminées par Sweaton et Baes à différentes températures. Nous disposons donc des éléments pour évaluer l'influence du conditionnement de l'eau sur la vitesse d'érosion-corrosion en réunissant les valeurs numériques fournies par les équations (5) et (6).

Comme application, nous avons calculé les vitesses de corrosion relatives pour différents conditionnements de l'eau d'un générateur de vapeur à un seul passage équipant une centrale électrique et ayant subi une érosion-corrosion sévère à la fin de la zone d'évaporation (titre de 90 % en vapeur) (Fig. 2).

La mesure de la production d'hydrogène dans ce générateur (en relation directe avec la vitesse de corrosion : cf. équations (1) et (2)) a permis de vérifier un bon accord entre les valeurs mesurées et les prévisions théoriques (Fig. 3).

pH à 25 °C	8,5	8,8	9,0	9,1	9,2	9,3	9,4	9,5	9,6
<i>Avec de l'ammoniaque</i>									
(titre en vapeur 90 %)	0,88	0,77	0,64	0,58	0,50	0,43	0,37	0,31	0,27
(titre en vapeur 0 %)	0,55	0,50	0,39	0,34	0,29	0,25	0,22	0,20	0,18
<i>Avec de la morpholine</i>									
(dans l'eau ou la vapeur humide) (*)	0,50	0,31	0,23	0,20	0,17	0,16	0,14	0,13	0,13

(\*) Le coefficient de partage de la morpholine entre l'eau et la vapeur est pris égal à 1.

Figure 2 - Rapports entre les vitesses de corrosion à différents pH dans les conditions d'un générateur de vapeur de centrale graphite gaz (250 °C - titre 90 % en vapeur), et la vitesse obtenue dans l'eau à 250 °C à pH neutre prise comme référence.

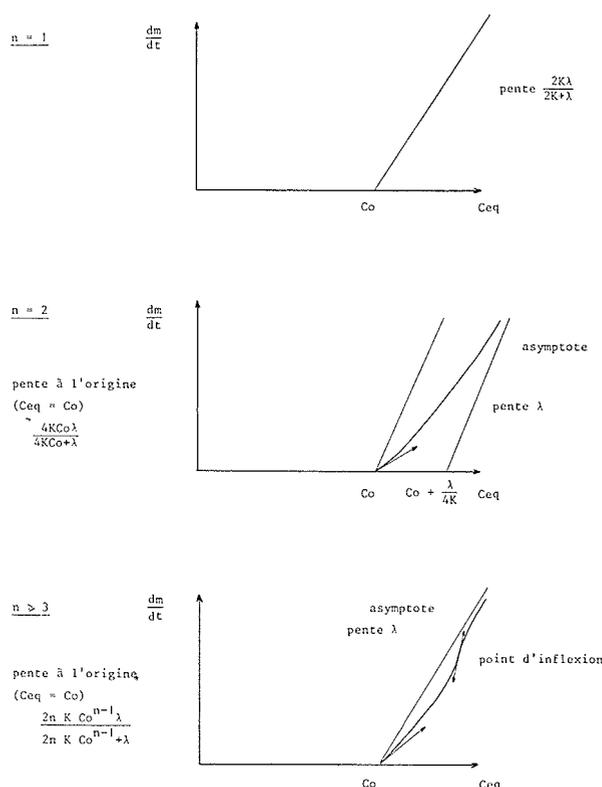


Figure 1 - Influence de l'ordre de la réaction de réduction.

Remarques

- Aucun des mécanismes invoqués ne fait appel à un endommagement mécanique dû à l'écoulement.
- En milieu stagnant, comme le modèle l'explique bien, la vitesse de corrosion devient négligeable à long terme : la concentration en fer ferreux à la paroi atteint la valeur d'équilibre (Fig. 4).
- En présence d'agents complexants (Cl<sup>-</sup>), la concentration en fer soluble à l'équilibre (et donc l'érosion-corrosion) seront plus fortes.
- En présence d'oxygène, le fer ferrique (moins soluble que le fer ferreux) est produit : il y a réduction de l'érosion-corrosion.
- Si une couche d'oxyde est préformée sur la paroi d'acier, un certain délai est nécessaire pour dissoudre au moins partiellement cette couche et atteindre le régime établi : on constate un temps d'incubation.

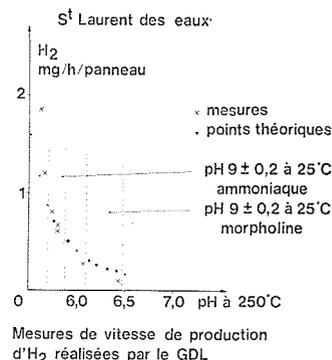


Figure 3 - Résultats expérimentaux.

**Evaluation expérimentale**

La boucle CIROCO permet d'étudier en phase liquide, l'influence des différents paramètres physicochimiques intervenant sur l'érosion-corrosion. Jusqu'à présent, les travaux ont essentiellement porté sur l'étude du comportement de l'acier ordinaire à l'état brut ou préoxydé, dans l'eau déminéralisée, dégazée et traitée à l'ammoniaque ou à la morpholine. Quelques essais ont également été conduits sur des aciers faiblement alliés.

*Conditions physicochimiques reproduites par l'installation*

Dans la cellule d'essai, l'eau préalablement conditionnée (pH 9 à 9,6 ; 20 ppb d'hydrazine), surpressée et réchauffée à 225 °C est accélérée dans un ajutage convergent : le jet d'eau propulsé à environ 60 m/s fait impact avec un angle d'incidence de 45° sur la face plane d'une éprouvette. Quatre ajutages identiques permettent d'attaquer successivement par érosion - corrosion quatre éprouvettes dans des conditions physicochimiques quasi identiques. Après refroidissement et détente, la totalité du débit d'eau traverse un lit mélangé de résines échangeuses d'ions en vue d'une déminéralisation totale ; les teneurs en fer et en ions complexants (chlorures, sulfates) sont ainsi maintenues à des valeurs aussi basses que possible. Il est ensuite nécessaire de reconditionner le milieu par des injections appropriées de réactifs.

L'ensemble de l'installation est réalisé en acier inoxydable et en inconel 600.

*Mesures*

Dans les conditions décrites ci-dessus, l'érosion-corrosion, obtenue en quelques centaines d'heures est aisément mesurable par pesée des éprouvettes. Par des prélèvements permanents ou périodiques, il est possible de suivre, entre l'amont et l'aval de la cellule d'essai, l'évolution des paramètres chimiques suivants : pH, conductivité cationique, teneurs en chlorures, en sulfates, en fer, en hydrazine, en oxygène, ou hydrogène dissous.

*Interprétation des résultats*

Deux régimes cinétiques différents ont été mis en évidence suivant l'état de surface de l'acier : sur acier non préoxydé, l'attaque par érosion-corrosion est proportionnelle au temps ; au contraire, l'érosion-corrosion apparaît avec un certain retard sur des aciers préalablement oxydés par un séjour à chaud et en milieu aqueux stagnant (300 h à 250 °C).

L'ensemble des essais actuellement réalisés avec des éprouvettes non préoxydées, dans des conditions de température, vitesse et teneur en hydrogène identiques permet de vérifier qu'en l'absence d'ions complexants et à la dispersion expérimentale près, la vitesse d'érosion-corrosion dépend linéairement de la concentration en fer ferreux à l'équilibre autorisée par le pH du milieu.

Le microscope électronique à balayage a permis d'observer des ressemblances entre des éprouvettes de CIROCO et des matériaux ayant subi en centrale électrique, des cas réels d'érosion-corrosion. Certains clichés montrent une attaque sélective des grains de perlite. Il a été constaté, lors de certains essais, que la présence d'oxygène ralentit l'attaque, alors que des traces de chlorures ont l'effet contraire. L'étude détaillée de l'influence de ces paramètres n'a pas encore été menée à terme.

Des essais avec des aciers alliés ont montré la grande importance de la teneur en chrome sur la vitesse d'érosion : par exemple, par rapport à l'acier A 42, dans de l'eau traitée à l'ammoniaque (pH 9 à froid), à 180 °C, les aciers chromesco 1 (0,5 % Cr) et chromesco 3 (2,2 % Cr) permettent une réduction de la vitesse d'érosion-corrosion par des facteurs d'environ 20 et 75 respectivement.

**Conclusion**

L'étude entreprise a permis de confirmer le rôle très important joué par la chimie de l'eau sur l'érosion-corrosion de l'acier.

La formule  $\frac{dm}{dt} = \frac{2K\lambda}{2K + \lambda} (Ceq - Co)$  établie en prenant

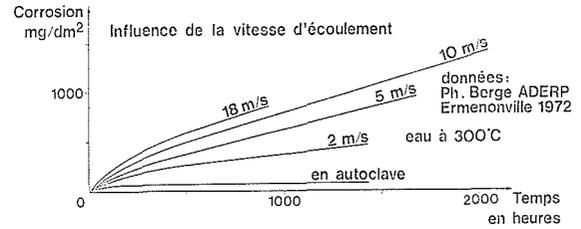


Figure 4

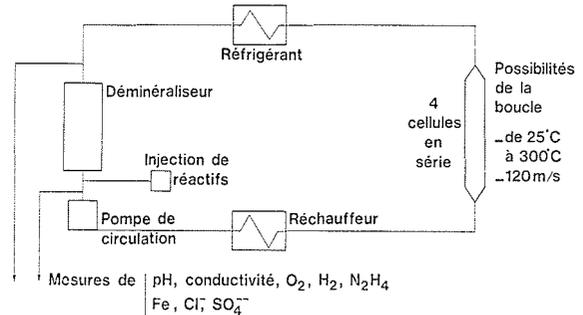


Figure 5 -- Etude expérimentale. Boucle CIROCO.

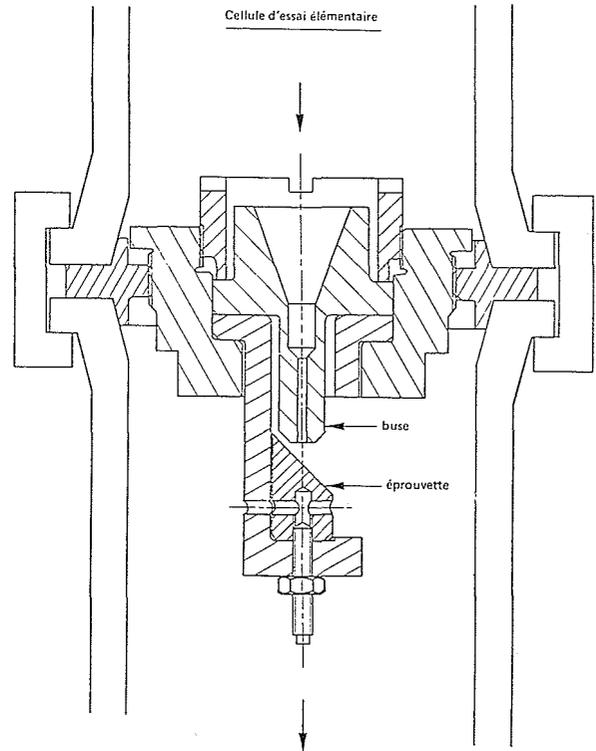


Figure 6

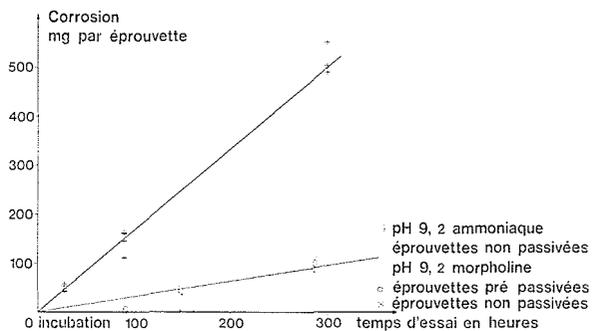


Figure 7 -- Etudes de cinétique sur CIROCO.

en compte la cinétique de la réaction de réduction de la magné-  
tite permet de quantifier le rôle du pH sur l'érosion-corrosion  
et semble confirmée par les mesures obtenues en centrale  
ou en laboratoire.

## Erosion-corrosion des aciers au carbone dans la vapeur circulant à grande vitesse : étude expérimentale

MM. BOUCHACOURT et SAINT PAUL

Direction des Etudes et Recherches, Electricité de France,  
Les Renardières

Afin de mieux comprendre et d'essayer de remédier aux  
phénomènes d'érosion-corrosion susceptibles de se produire  
dans les circuits d'eau et d'eau-vapeur des centrales productrices  
d'électricité, une étude a été entreprise aux Renardières sur  
une boucle avec circulation d'eau à grande vitesse (boucle  
"CIROCO"). Cependant, dans le but de vérifier que les phéno-  
mènes en milieu eau sont semblables à ceux en milieu eau-  
vapeur, une campagne d'essais a également été lancée sur une  
boucle diphasique installée chez Fives Cail Babcock (La Cour-  
neuve), pour évaluer l'influence de différents paramètres tels  
que : la température et la vitesse de l'émulsion, le pH, le con-  
ditionnement chimique de l'eau (ammoniaque, morpholine),  
l'état d'oxydation du matériau, sur l'érosion-corrosion des  
aciers au carbone dans la vapeur humide circulant à grande  
vitesse.

### Description de la boucle d'essais

#### Circuit eau-vapeur

Ce circuit comprend, dans le sens de l'écoulement (Fig. 1) :

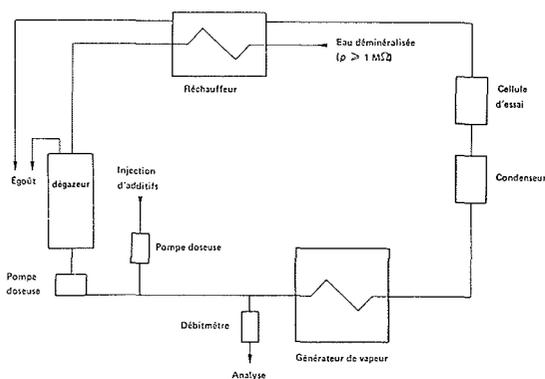


Figure 1 – Schéma de principe de la boucle installée chez Fives  
Cail Babcock (boucle à eau perdue).

- une arrivée d'eau déminéralisée ( $\geq 1 M\Omega$ ) ;
- un réchauffeur d'eau permettant de régler la température  
de l'eau entre 110 et 140°C à l'aide de vapeur prélevée en  
sortie du circuit ;
- un dégazeur thermique permettant d'abaisser la teneur en  
oxygène ( $\leq 5$  ppb) ;
- une pompe doseuse d'alimentation ;
- un dispositif d'injection des agents de conditionnement :  
ammoniaque, morpholine... comportant une pompe doseuse ;
- un dispositif de prélèvement permettant d'effectuer diffé-  
rents contrôles : mesures de pH, de conductivité, de teneur  
en oxygène dissous, de teneur en silice dissoute... ;
- un surchauffeur constitué par un tube placé dans un four  
dont la température interne est réglable et maintenue constante  
par un régulateur ;

La résistance des aciers à teneur en chrome même très faible  
est considérablement améliorée par rapport à celle de l'acier  
non allié.

- un condenseur permettant, par la mesure de la puissance  
d'échange et de son réglage, de définir le titre de l'émulsion eau-  
vapeur entre 50 et 90 % en vapeur ; l'homogénéisation de l'émul-  
sion est effectuée par un diaphragme à la sortie du condenseur ;
- deux cellules d'essais (Fig. 2) comportant une buse de faible  
diamètre (5 mm) qui projette un jet de vapeur humide à grande  
vitesse (choisie entre 30 et 100 m/s) perpendiculairement aux  
éprouvettes. Les éprouvettes se présentent sous la forme de  
disques de diamètre 76 mm et d'épaisseur 10 mm.

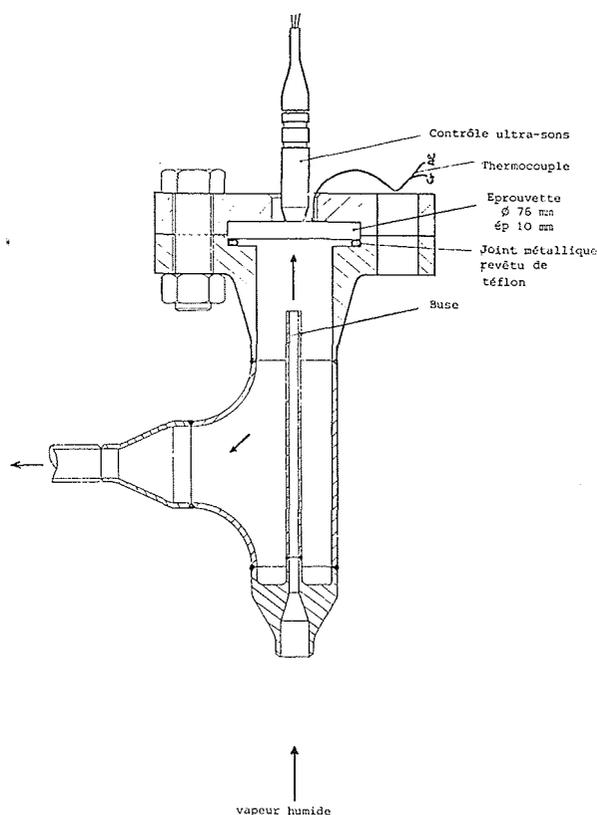


Figure 2 – Cellule d'essai des phénomènes d'érosion-corrosion.

La boucle d'essai est une boucle à eau perdue ; le mélange  
eau-vapeur ayant traversé la section d'essai est ensuite utilisé  
au réchauffage initial de l'eau alimentaire avant d'être condensé  
et rejeté à l'égout après refroidissement.

#### Mesure de l'épaisseur des éprouvettes

Un dispositif de contrôle d'épaisseur par ultra-sons permet  
de suivre, au cours de l'essai, l'usure de l'éprouvette (résolution  
10  $\mu$ m).

#### Programme de l'étude

Le programme d'essais porte sur l'étude de l'influence des dif-  
férents paramètres suivants :

- paramètres liés aux éprouvettes :
  - nature du matériau : acier au carbone ou faiblement allié
  - état de surface : éprouvettes polies (0,2  $\mu$ m alumine) ou  
éprouvettes polies puis oxydées 10 jours en autoclave à 300 °C  
dans la vapeur d'eau ;

- paramètres physiques de l'émulsion :
  - température (150 à 250 °C),
  - vitesse (30 à 100 m/s),
  - titre (50 à 90 % en vapeur) ;
- paramètres liés à la chimie de l'émulsion :
  - ajustement du pH par conditionnement ammoniacal ou morpholine,
  - influence d'ajouts d'hydrazine, d'oxygène, d'ions  $Fe^{2+}$ ,  $Cl^-$  ou  $SO_4^{2-}$ .

## Point d'avancement

### Essais préliminaires

Des essais préliminaires ont été effectués, à trois températures différentes, en eau non conditionnée sur des éprouvettes en acier A42 polies, pour évaluer l'importance du phénomène étudié et les performances de l'appareillage utilisé pour la mesure de l'épaisseur de l'éprouvette par ultra-sons.

Les résultats obtenus sont présentés dans le tableau I. On note la bonne concordance des résultats concernant la mesure de la profondeur de la cavité par le dispositif à ultra-sons et celle obtenue au profilomètre en fin d'essai : la figure 3 montre à titre d'exemple un profil de la cavité obtenue en fin de l'essai n° 6.

Les courbes représentant la diminution de l'épaisseur de l'éprouvette en fonction de la durée de l'essai montrent que la vitesse d'érosion-corrosion est constante au cours de l'essai (Fig. 4).

D'autre part, les premiers résultats obtenus ont montré que pour mesurer avec précision cette vitesse au cours d'un essai, il faut, compte tenu de la précision du dispositif de contrôle par ultra-sons utilisé, une durée d'essai de l'ordre de 50 à 100 h. Cependant, les résultats préliminaires ont permis de montrer la validité de cette méthode de mesure et de mettre en évidence le rôle de la température et de la vitesse de l'émulsion : on a pu

vérifier que la vitesse d'érosion-corrosion augmente quand la température diminue et quand la vitesse de l'émulsion augmente.

### Essai en eau conditionnée

Un essai en eau conditionnée a été effectué. Les conditions de l'essai ont été les suivantes :

- température de l'émulsion : 175 °C
- vitesse de l'émulsion : 75,7 m/s
- titre de l'émulsion : 67,5 % en vapeur
- conditionnement pH = 9,0 (à 25 °C) en ammoniacal.

La comparaison des résultats obtenus lors de cet essai et lors d'un essai réalisé avec de l'eau non conditionnée mais avec des caractéristiques thermohydrauliques semblables ne montre pas de différence importante entre les vitesses de corrosion (voir tableau II).

Cette absence d'influence du conditionnement de l'eau sur la vitesse d'érosion-corrosion est peut-être liée à une vitesse d'émulsion trop élevée avec, dans cette hypothèse, une érosion de l'éprouvette par les gouttes d'eau. Une étude est en cours, pour vérifier si le faciès présenté par l'éprouvette est le même que celui observé sur les éprouvettes de la boucle CIROCO et des essais, à vitesse plus faible, vont être entrepris.

## Conclusion

Les essais préliminaires d'érosion-corrosion effectués en vapeur humide à grande vitesse ont permis d'établir la validité du dispositif par ultra-sons utilisé pour suivre en continu la perte d'épaisseur d'éprouvettes en aciers au carbone et de montrer le rôle de la température et de la vitesse de l'émulsion sur la vitesse d'érosion-corrosion.

Les essais en cours devraient permettre d'évaluer l'influence de différents paramètres et en particulier de la chimie de l'émulsion sur l'importance du phénomène.

Tableau 1 — Essais préliminaires, en eau non conditionnée

Essai n°	Température d'émulsion (°C)	Titre en vapeur (%)	Vitesse de l'émulsion (m/s)	Durée de l'essai (h)	Profondeur de la cavité obtenue (mm)			Vitesse de perte de métal (µm/h)
					Profilomètre	Contrôle US à chaud	Contrôle US à froid	
1	225	70	70	2	—	—	—	—
2	225	84	70	31	0,038	—	0,03/0,04	1,2
3	225	84	70	96	moyen : 0,09 maxi : 0,1	0,05	0,08/0,09	0,9
4	225	77	51	96	0,020	—	0,02/0,03	0,3
5	200	74	70	77	moyen : 0,07 maxi : 0,09	0,05	0,08	1,0
6	175	69	77	180	0,45	0,42	0,41/0,42	2,5
9	175	71	79,5	119	0,54	0,42	0,46/0,48	3,6 à 4,5

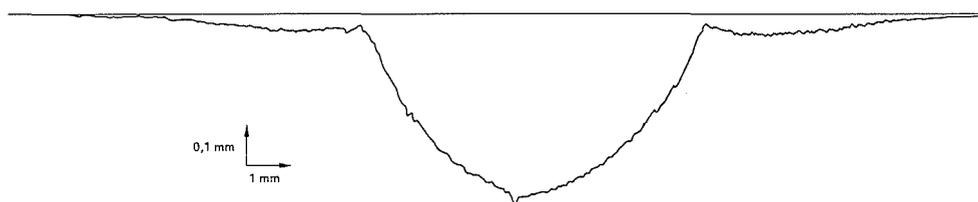


Figure 3 — Cavité obtenue après essai (vue en coupe au profilomètre), essai n° 6 : 175 °C, 69 % vapeur, 77 m/s, 180 h.

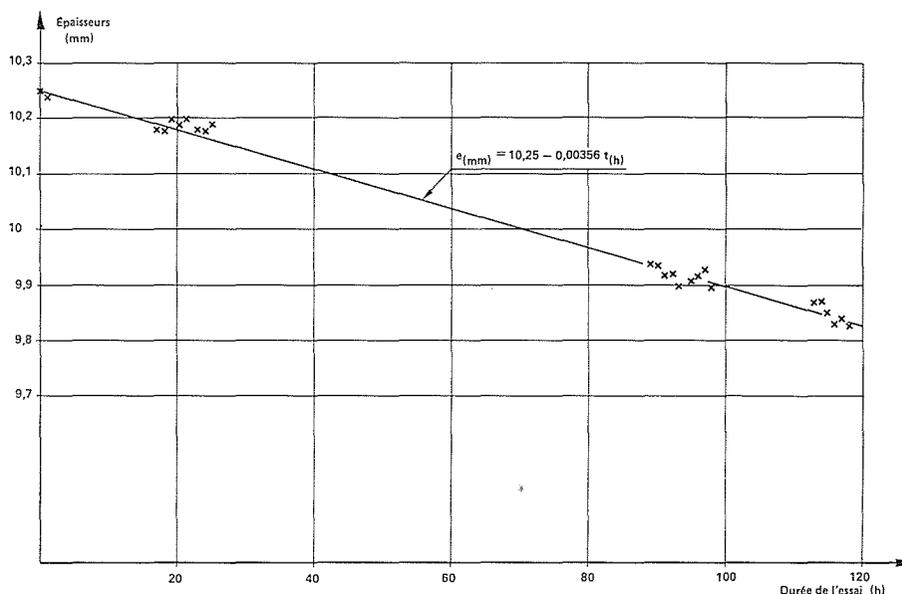


Figure 4 -- Variation de l'épaisseur de l'éprouvette en acier A42 en fonction du temps, essai n° 9 : 175 °C, 71 % vapeur, 79,5 m/s.

Durée de l'essai (h)	0	146	317	462
		(146 h)	(171 h)	(145 h)
Conditionnement	—	pH ~ 9,0 à 25 °C ammoniacale		—
Vitesse calculée (µm/h)	2,3	2,0		2,8

#### • Séance du jeudi 19 mars – Après-midi

Discussion de la Communication de M. P. MARCHAND : *Travaux français sur l'énergie thermique des mers.*

M. MARCHAND fait son exposé.

M. le Président. — Je remercie M. MARCHAND de cette vue d'ensemble du problème qui, je pense, va nous introduire parfaitement aux sujets qui sont traités par les conférenciers suivants.

Mais peut-être y a-t-il parmi vous des personnes qui voudraient faire des observations ou demander des explications à M. MARCHAND ?

Peut-être aussi pourrions-nous rassembler les discussions à la fin, quand nous aurons vu d'autres aspects ? Cela paraît être le désir général.

Discussion de la Communication de M. R. THIENNOT : *Energie thermique des mers : les centrales à cycle thermodynamique fermé.*

M. THIENNOT fait son exposé.

M. le Président. — Je remercie beaucoup M. THIENNOT de cet exposé technique très complet qui nous a montré qu'il y avait des possibilités réelles tout à fait prometteuses, aussi bien en ce qui concerne l'énergie thermique qu'en ce qui concerne des retombées telles que l'aquaculture et autres.

Y a-t-il parmi vous une demande d'information auprès de M. THIENNOT ?

M. GAUTHIER. — Il y a un point sur lequel vous êtes passé assez rapidement. Vous n'avez pas dit si vous avez fait des recherches sur la recirculation à la source chaude des eaux refroidies à 24°. Ces eaux ont un débit du même ordre de grandeur que les débits de refroidissement des centrales nucléaires. Or, dans ces centrales, la zone d'influence du rejet d'eau froide se situe sur une dizaine de kilomètres carrés. Dans le dessin schématique que vous avez fait, la prise et le rejet d'eau chaude sont à 200 mètres. Avez-vous fait des études comparables à celles qu'EDF a faites pour résoudre ce problème et développer des solutions, par exemple comme celle de Paluel, où le rejet est à 800 mètres ?

M. THIENNOT. — Eviter le recyclage dans la centrale des eaux de rejet est un problème majeur, tout aussi important à propos des eaux chaudes que les eaux froides.

Il doit être résolu en fonction des caractéristiques particulières du site d'implantation de la centrale.

Dans le cas présent, la centrale ne sera vraisemblablement pas implantée sur le site envisagé dans notre étude et nous n'avons pas étudié spécialement ce problème.

Cependant, nous avons prévu les dispositions suivantes qui, avant toute étude, paraissent devoir prémunir contre ce risque de recyclage.

Ces dispositions représentent les solutions possibles.

a) Pour la centrale de 3,5 MW, nous avons prévu de mélanger à la sortie de l'usine les eaux chaude et froide et de les rejeter à la profondeur de 80 m en les refoulant dans l'espace annulaire compris entre le tunnel et la conduite d'arrivée d'eau froide. La profondeur de 80 mètres est suffisante et nous ne provoquerons aucun recyclage de ces eaux mélangées ni avec les eaux chaudes de surface, ni avec les eaux froides des fonds. L'abondante littérature publiée sur ce sujet est formelle.

b) Pour la centrale de 10 MW, la même solution peut être retenue sans difficulté. Cependant, en variante nous avons prévu la solution que je vous ai présentée. Les eaux froides seules sont rejetées par le tunnel ; elles iront chercher en profondeur leur couche d'équilibre de densité.

Les eaux chaudes sont rejetées en surface dans la lagune en direction d'une passe naturelle communiquant avec la mer.

D'autre part, la digue d'accès à la centrale isole l'une de l'autre les deux parties de la lagune : celle où se fait l'aspiration, de celle où se fait le rejet. Ces dispositions plus économique seraient-elles suffisantes ? Une étude hydrologique permettrait de le savoir. Mais en tout état de cause, la possibilité de rejet par le tunnel subsiste.

*M. HENTSCHEL.* — Comment se présente le problème du nettoyage des échangeurs en milieu marin ? Il n'a pas été évoqué.

*M. THIENNOT.* — Nous devons nous prémunir contre les biosalissures qui se fixeraient dans les échangeurs et les circuits d'eau.

Elles se développeront surtout dans le circuit d'eau chaude. Les eaux froides quasi exemptes de microorganismes, ne favorisent pas leur croissance.

Pour nettoyer les échangeurs de ces biosalissures qui réduiraient considérablement les coefficients d'échanges thermiques, nous avons prévu d'utiliser :

- des échangeurs à tubes d'eau ;
- un nettoyage mécanique par système à balles de plastique rugueuses parcourant les tubes, du même type que celui utilisé par EDF pour nettoyer les condenseurs des centrales nucléaires. Ce système donne pleine satisfaction.

A ce sujet je dois signaler que nous avons fermement rejeté l'emploi pour le nettoyage, de procédés chimiques à base d'hypochlorite entre autres, auxquels on a souvent recours. L'emploi de tels procédés est formellement proscrit à Tahiti afin de protéger l'environnement.

Les échangeurs à tubes se prêtent bien au nettoyage mécanique alors que les échangeurs à plaque du type signalé précédemment par M. MARCHAND, nécessitent de recourir au nettoyage chimique. C'est pourquoi nos échangeurs sont à tubes.

*M. BONNIN.* — Vous serait-il possible d'esquisser un calendrier plausible de réalisation ?

*M. THIENNOT.* — Nous avons établi notre projet en nous basant sur des données physiques relevées dans la littérature — pour certains coefficients d'échange de chaleur en particulier — ou accumulés par expérience dans nos laboratoires. Nous ne pouvons cependant nous engager "à prix donné" dans la réalisation d'une telle centrale sans vérifier au préalable et mesurer nous-mêmes les paramètres dont dépendent le dimensionnement et le coût des appareils.

Nous avons donc prévu un programme d'essais qui portera sur les coefficients d'échange, la croissance des biosalissures, la détermination des efforts engendrés dans la conduite d'eau froide par la houle et les courants, etc.

Ce programme d'essais que nous appelons "de confirmation", durera un an environ. Il sera accompagné de relevés effectués sur le site : mesure de température, des courants, bathymétrie des fonds, nature des sols, etc.

Après ces essais, nous serions en mesure d'établir le projet complet de la centrale sur le site qui nous sera proposé.

Etude de projet et réalisation devraient durer 3 ans 1/2, de telle sorte qu'une centrale de 10 à 15 MW nets pourrait être décidée à Tahiti fin 1982. Elle entrerait en service en 1985-1986.

*M. DARIC.* — Il y a un problème qui n'a pas été évoqué mais qui a peut-être une importance également : c'est le problème du démarrage de la centrale, car elle ne possède pas en elle-même les moyens de démarrage propre et elle est obligée de faire appel à des sources extérieures.

2<sup>e</sup> question : Est-il indiscret de savoir quelle est la nature des métaux utilisés pour la construction des échangeurs qui ont été retenus ?

3<sup>e</sup> question : Est-ce que l'étude des marchés possibles ne conduirait pas à pousser plutôt les usines marines que les usines à terre ?

*M. THIENNOT.* — Votre première question concerne le démarrage d'une telle centrale. Vous avez pu voir que par les caractéristiques qu'elle présente, une telle centrale fonctionnera en centrale de base. Nous ferons appel au réseau pour la démarrer. Si nous avons décomposé la centrale en deux parties — vous avez vu qu'elle comporte deux groupes totalement indépendants — ce n'est pas parce que nous sommes limités par la puissance unitaire des groupes c'est parce que, en fractionnant la puissance, on réduit l'appel de courant au démarrage. Notons en passant que les opérations d'entretien sont également facilitées. On prévoit de faire le démarrage de nuit, puisque, sur le réseau, ne sera consommée en ce moment que la puissance minimum et que la centrale diesel en service pourra débiter la puissance de pointe qui laissera disponible un large excédent de puissance (10 MW). Nous nous arrangerons, bien entendu, pour limiter l'appel de courant des gros auxiliaires, des pompes en particulier, que nous démarrerons successivement et à loisir.

Nous avons prévu d'employer le titane pour la construction des échangeurs. Le titane est très coûteux mais il résiste remarquablement à la corrosion et présente des caractéristiques mécaniques exceptionnelles. Notre choix résulte du fait que la centrale doit rester en service 30 ans. Pour une première réalisation, nous n'avons pas voulu accumuler les innovations. Mais au cours des essais de confirmation à entreprendre, nous effectuerons des tests de corrosion sur d'autres métaux envisageables, des alliages d'aluminium et des aciers inoxydables en particulier.

Aucune étude de marché n'a réellement été faite pour déterminer le nombre des centrales à construire dans le monde. Nous nous sommes contentés d'analyser les résultats du recensement des sites favorables fait par le CNEXO, en tenant compte des écarts de températures, de la distance au rivage des fonds de 1 000 m et des populations. Il résulte de là qu'un marché important de ces centrales est à prévoir, à peu près également partagé entre centrales à terre et en mer.

En tout état de cause, il ressort de l'abondante littérature publiée que la puissance des centrales à terre restera vraisemblablement limitée aux environs de 40 à 50 MW par groupe unitaire, les limitations étant imposées par les possibilités de fabrication et de pose de la conduite d'eau froide (diamètre maximum environ 8 à 10 m).

Les centrales flottantes, pour des raisons de tenue à la mer, exigeront des plates-formes support-barges ou plates-formes semi-submersibles de tonnage important, donc coûteuses. Ce type de centrale paraît devoir être réservé aux fortes puissances, au-delà de 40 à 50 MW.

*M. GAUTHIER.* — Je voudrais intervenir sur ce point. Il faut tout de même noter qu'il n'y a qu'un très petit nombre de sites dans lesquels la puissance installée dépasse 10 MW, c'est-à-dire que la plupart des sites à terre, sauf Tahiti, sont des sites où la puissance du réseau est très faible, ce qui est une difficulté pour les centrales à terre. Il semble donc que le marché des centrales au large reliées à la terre soit plus important que le marché des centrales à terre proprement dites.

*M. THIENNOT.* — Je pense qu'il faudrait faire une étude très approfondie à ce sujet.

*M. GAUTHIER.* — C'est un aspect que nous avons effectivement examiné et sur lequel je souhaitais exprimer notre point de vue.

*M. THIENNOT.* — Je reprends ce que disait M. MARCHAND : il y a plus d'une centaine de centrales de ce type à réaliser car, dans cette région, il y a énormément d'îles.

*M. le Président.* — Et elles sont plus ou moins toutes favorables au point de vue bathymétrie.

*M. THIENNOT.* — Il faudrait pouvoir projeter ici une carte du fond des Océans.

*M. CLEMENT.* — Je poserai une question corollaire à ce que vient de dire M. GAUTHIER : quelles sont les possibilités de

marché pour les centrales de 100 MW envisagées par les américains ?

*M. THIENNOT.* — Comme l'a dit M. MARCHAND, les américains se sont orientés vers des centrales flottantes de forte puissance pour alimenter le territoire des Etats-Unis en énergie. Il y a en bordure des côtes américaines, un très large plateau continental qui ne permet pas d'atteindre les profondeurs voulues, à proximité immédiate des côtes. Ainsi, dans le Golfe du Mexique, il faut aller au grand large, à 100 miles ou 200 miles des côtes pour atteindre le  $\Delta T$  voulu. Seules les centrales flottantes sont alors envisageables. Elles seront reliées à la terre par un câble transmettant l'énergie, ou bien l'utiliseront sur place dans des usines flottantes ou la transformeront en un produit vecteur d'énergie (ammoniac, hydrogène, méthanol, etc.). Voilà pourquoi les Etats-Unis envisagent des centrales en mer de 100 et même 400 MW. Ils envisagent parallèlement des centrales de plus petite puissance de 10 à 40 MW mais pour l'exportation. Ils prévoient en effet que le marché sera très important.

*M. le Président.* — Les conditions d'emploi sont très différentes.

*M. THIENNOT.* — Elles sont en effet très différentes de celles de nos îles du Pacifique, par exemple.

*M. le Président.* — Je voudrais demander quelques informations à M. THIENNOT. La région de Tahiti est une région où il fait ordinairement beau ; mais il y a tout de même des tsunamis ; les tremblements de terre sont fréquents dans le Pacifique et ils peuvent entraîner des conditions marines assez particulières et exceptionnelles. Il faut en tenir compte dans une centrale qui reste trente ans en fonctionnement.

*M. THIENNOT.* — C'est un fait, des tremblements de terre et des tsunamis peuvent se produire. Ils sont rares et peu importants à Tahiti. Mais la Polynésie reste menacée dans le Sud-Ouest par l'arc de l'Archipel des Tongas, siège de séismes.

*M. le Président.* — Le Pacifique est un endroit très particulier pour les tsunamis, de même l'Alaska et le Chili. Il y en a de considérables à Hawaï.

*M. MARCHAND.* — Ceux qui se produisent à Tahiti sont relativement rassurants ; ils donnent un maximum de vagues de l'ordre de 5 à 6 m ; ce sont des petits tsunamis.

*M. THIENNOT.* — Dans le cas étudié, le problème n'a pas paru très grave.

*Le Président.* — A Hawaï, par exemple, c'est différent il peut y avoir des phénomènes considérables, des vagues de plusieurs dizaines de mètres qui démolissent tout ce qui se trouve sur la côte, jusqu'à 40 m au-dessus du niveau de l'eau. Cela s'est passé notamment en avril 1946. C'est une question de concentration d'énergie.

*M. THIENNOT.* — Si un tel risque est à craindre, l'implantation de la centrale doit être recherchée à l'abri du choc direct de l'onde la plus menaçante ayant son origine dans les zones de séismes possibles. Ces dernières sont bien connues.

*M. CHABERT d'HIERES.* — Les champs de courants en profondeur et en surface sont-ils suffisamment bien connus pour permettre le calcul des efforts exceptionnels que doit être capable de supporter la conduite ? Monsieur le Président a fait une mise en garde contre les effets des tsunamis. Je pense qu'il faut noter les effets répétés des ondes internes et autres phénomènes océaniques qui peuvent engendrer des courants très internes.

*M. THIENNOT.* — Les tsunamis se manifestent en surface par un train d'ondes de très forte amplitude et de très grande longueur d'onde (plusieurs kilomètres). Ce train d'onde balaye tout sur les côtes atteintes. Comment ce train d'onde se propage-t-il en profondeur ? Nul ne le sait. A grande distance de l'épicentre, il est très possible que son effet devienne assez semblable à celui de la houle et que décroissant avec la profondeur, il ébranle relativement peu les corps profondément immergés comme la conduite d'eau froide d'une centrale à terre. Des essais en bassin hydrodynamique de grande longueur devraient permettre d'analyser et de mieux connaître le phénomène.

D'autre part, sans davantage évoquer l'effet des tsunamis, des courants meuvent les masses océaniques en permanence dans toute leur profondeur. Ils sont en général faibles et inférieurs à un nœud. Les essais de confirmation dont j'ai parlé

ont pour but d'en déterminer au bassin, les effets sur la conduite après qu'ils auront été mesurés en grandeur sur le site.

Le cas de courant nul et d'aspiration en eau calme a été étudié par M. NIZERY dans les années 1942 à 1950.

*M. GAUTHIER.* — J'en parlerai rapidement dans mon exposé.

*M. CHABERT d'HIERES.* — Le problème est un problème d'aspiration avec frontière, alors que les études ont été faites dans une masse de fluide illimité.

*M. GAUTHIER.* — C'est en effet un problème avec frontière.

*M. THIENNOT.* — Les essais ont été effectués en milieu limité avec présence simulée du fond. Les mouvements de la masse liquide se produisent dans une tranche d'épaisseur limitée faible par rapport à la profondeur et située au niveau de la prise d'eau. Les autres couches ne sont pas intéressées.

*M. le Président.* — On pompe, l'eau qui arrive provient du niveau où l'eau à la même densité qu'au point d'aspiration.

*M. CHABERT d'HIERES.* — Il s'agissait de tourbillons géographiques d'où vient l'eau, ce n'était pas une question de cote.

*M. le Président.* — De toute façon, étant donnée la méconnaissance que nous avons des courants océaniques sur un site quelconque, je crois qu'il sera prudent de faire des observations de courants jusqu'à des profondeurs de mille mètres au moins pendant une année ou même un peu plus avant de faire quoi que ce soit. Il ne faut pas se faire d'illusion : les courants océaniques ne sont pas connus.

*M. THIENNOT.* — Pour notre projet, le CNEXO prévoit de faire des mesures de courants sur site, à différents niveaux de profondeurs, pendant une durée prolongée d'au moins deux ans.

*M. MARCHAND.* — Une mini-campagne courantométrique avait précédé l'expérience américaine d'une petite centrale ETM, MINI-OTEC. Elle avait estimé les courants de surface maximum au large d'Hawaï, à 2 nœuds. MINI-OTEC pendant ses 3 mois d'expérimentation a permis d'enregistrer des courants de 3 nœuds. Ceci prouve que pour bien connaître les courants, il faut au minimum une campagne de mesures sur un cycle annuel, compte tenu de leur grande variabilité dans le temps et sur l'ensemble de la colonne d'eau.

*M. CHABERT d'HIERES.* — Il faut surtout tenir compte de la direction de ces courants.

*M. THIENNOT.* — Les courants sont de direction très variable.

*M. le Président.* — Je remercie à nouveau M. THIENNOT de son exposé très complet, qui a suscité une discussion intéressante et fournie.

Discussion de la Communication de MM. M.F. GAUTHIER et J. ZAOUI : *Problèmes hydrauliques posés par les centrales ETM à cycle droit au large.*

*M. GAUTHIER* fait son exposé.

*M. le Président.* — Je remercie M. GAUTHIER de son exposé qui résume un certain nombre de points de vue concernant l'exploitation de l'énergie thermique.

Quelques-uns d'entre vous ont-ils des questions à poser à M. GAUTHIER ?

*M. CHABERT d'HIERES.* — La mesure des courants locaux me semble essentielle. On a trouvé, en mer d'Adaman, des ondes internes de 100 m d'amplitude engendrant des courants de 2 nœuds. Ces cisaillements verticaux peuvent incliner ou endommager le tube d'aspiration d'eau froide.

*M. GAUTHIER.* — Je ne possède pas d'informations sur les ondes internes. En général, elles sont d'autant plus importantes qu'on est plus près des côtes ; donc, se dégager de la côte est plutôt un élément favorable.

D'autre part, les ondes internes sont à période relativement lente : on parle d'heure classiquement et j'ai l'impression que ceci demanderait à être confirmé. Il y a effet de cisaillement, mais le tuyau d'eau froide a une stabilité générale positive, c'est-à-dire qu'en haut il est tiré par ses flotteurs et, en bas,

il est tiré par un lest, à condition que cela intéresse 1 000 m d'épaisseur. La tension du tuyau devra être déterminée en fonction des courants qui seront rencontrés pour chaque site. Ce problème a été examiné sur la base des données qui ont été arrêtées pour l'étude de faisabilité. Il sera à revoir dans le cadre des études de prototype.

*M. le Président.* — Je pense qu'il y a encore des études à faire.

*M. BONNIN.* — J'ai apprécié votre optimisme pour la solution flottante, mais je me demande s'il ne faudrait pas la tempérer sur certains points, ne serait-ce que sur le suivant : j'ai entendu dire dans tous les pays et à toutes les époques qu'il y avait des navires qui rompaient leurs amarres ; que risque-t-il d'arriver si votre tuyauterie lâchait ?

*M. GAUTHIER.* — J'ai passé sous silence les problèmes de la protection en cas de mer très forte. La solution qui est adoptée est une solution de désaccouplage, c'est-à-dire qu'on associe en permanence une bouée au bateau. En cas de mauvais temps, le tuyau est déconnecté du bateau et suspendu sous cette bouée à une profondeur adéquate. Le bateau est alors libre de modifier ses conditions d'ancrage pour faire face au mauvais temps. Comme la zone de référence du projet n'est pas soumise aux cyclones ainsi que cela a déjà été dit précédemment, ces dispositions doivent donner toute satisfactions.

*M. de QUELEN.* — Tout à l'heure, avec M. MARCHAND, on a vu une centrale dessinée par ETM qui correspondait vraisemblablement à des puissances plus importantes que celles dont vous venez de parler.

Pourriez-vous dire, compte tenu des ordres de grandeur, quelle est la frontière entre ces deux types ?

*M. GAUTHIER.* — C'est, en fait, une frontière de prix du caisson qui doit contenir les équipements. D'après les études préliminaires, la frontière se situe, je crois, entre 30 et 50 MW, dans la gamme des 100 MW. Il semble que les solutions semi-submersibles, dont un schéma a été présenté par M. MARCHAND, sont beaucoup plus intéressantes, car elles sont très peu sensibles à la houle, et le prix de la structure devient raisonnable sur le bilan de l'ensemble.

Par contre, pour des centrales inférieures à 30 MW, le prix de la structure est déterminant sur l'économie générale du projet et les solutions flottantes paraissent sensiblement plus intéressantes. Par ailleurs, les dimensions étant plus petites, les problèmes de carène liquide à l'intérieur sont plus faciles à contrôler.

*M. THIENNOT.* — Vous avez précisé que dans la solution purement flottante, vous rejetez l'eau en mélange eau chaude — eau froide de manière à ne pas avoir de recyclage possible à l'aspiration de l'aspiration de l'eau chaude.

Vous tablez sur le fait que le mélange à température plus basse aura une densité plus grande et s'écoulera directement vers les profondeurs.

La barge supportant la centrale n'est pas seulement soumise au pilonnement, elle est soumise aussi au roulis-tangage. Dans ces mouvements, des masses d'eau importantes sont entraînées qui, par conséquent, provoquent un certain brassage de l'eau autour de la plate-forme.

Dans ces conditions, ne risque-t-on pas de voir apparaître un phénomène de recyclage dès que la houle se formera ?

*M. GAUTHIER.* — Absolument pas. Les ordres de grandeurs des phénomènes ne sont pas les mêmes. Les panaches, que j'ai personnellement très bien étudiés, descendent en une fraction de minute à plus de 50 m. La stabilité de ce type de masse d'eau est extrêmement grande ainsi que cela se voit par exemple dans les études de thermocline. Au large, un vent ne détruira les stratifications que sur des profondeurs de 30 m à peu près et avec des gradients thermiques de l'ordre de 1 à 2°. Ici, nous bénéficions d'écart densimétriques sensiblement plus forts.

*M. THIENNOT.* — Il faudrait faire une expérimentation.

*M. GAUTHIER.* — Ce type de problème a déjà été très étudié, en particulier par ABRAHAM en Hollande, FAN et BROOKS à Los-Angeles, G.I. TAYLOR, MORTON et TURNER en Angleterre et par nous-même en France.

Mais de toute façon, il y a une solution très simple que nous avons projetée initialement. Elle consiste à rejeter ce débit d'eau à l'aide d'une manche verticale de faible hauteur, disons 50 m, et qui peut être assez souple pour éviter les problèmes de liaison avec le bateau.

*M. le Président.* — Il y a quand même des questions de puissance : j'ai compris que les puissances envisagées pour ces centrales flottantes sont plus importantes.

*M. GAUTHIER.* — Cela va de 1 à 10. Au départ, nous avons étudié une centrale de 3,5 et nous avons fait l'extrapolation. Nous sommes arrivés un peu aux mêmes conclusions que le groupe Creusot-Loire : extrapoler à 15 MW quand on sait faire 10 MW ne pose pas de problème. Mais dans le cas cité précédemment où les eaux froides seraient utilisées en aquaculture, l'augmentation de puissance n'est pas très pertinente compte tenu des volumes mis en jeu et des précautions nécessaires au milieu vivant. On peut incidemment rappeler que l'étude que le CNEXO avait menée pour l'aquaculture était dans la gamme de 800 kW. Par ailleurs, coupler les difficultés d'aquaculture et les difficultés de l'énergie thermique des mers n'est peut-être pas à prôner pour une expérience pilote.

*M. THIENNOT.* — Certainement pas pour une expérience pilote, et même cela ne se réalisera pas ; mais il est des cas où cela peut être fort intéressant.

*M. GAUTHIER.* — Cela soulève tout de même de grandes difficultés : en particulier, comment garderons-nous ces eaux sans les mélanger aux eaux chaudes de surface ? Le corail est un matériau extrêmement poreux ; il faudrait donc de très gros travaux pour séparer les eaux froides à 9° des eaux ayant des températures de 24 ou 25° sans choc thermique supérieur à 2 ou 3°. Je pense que le couplage d'une centrale ETM avec l'aquaculture fait partie de vues futuristes, comme celle de l'ETM avec la production d'ammoniac.

Par contre, je crois aux problèmes de production de froid et aux problèmes de production d'eau douce, car il s'agit là d'une industrie assez homogène, avec des technologies existantes.

*M. THIENNOT.* — Il n'est pas question d'utiliser directement l'eau froide en aquaculture, car on risquerait en effet de provoquer des chocs thermiques qui seraient insupportables pour la vie animale. L'eau froide remontée des fonds ne peut être utilisée en aquaculture qu'après un certain réchauffage.

