

ÉLECTROCHIMIE

FIXATION DE L'AZOTE DE L'AIR par le procédé Schœnherr

Parmi les procédés de fixation de l'azote de l'air atmosphérique qui sont basés sur l'emploi d'un arc électrique, le procédé Schœnherr mérite une mention spéciale, tant au point de vue de son originalité, qu'au point de vue du rendement économique auquel il permet d'atteindre. Il a d'ailleurs valu à son auteur la médaille d'or LIEBIG. La question des *nitrates* étant une des grandes questions industrielles à l'ordre du jour, nous avons pensé qu'il serait sans doute intéressant de donner ici quelques indications sur le procédé Schœnherr, d'après les conférences faites par l'inventeur lui-même, d'abord à Iéna, le 11 juin 1908, à l'Assemblée générale du *Verein deutscher Chemiker* (*), ensuite à une séance de l'*Elektrotechnischen Vereins*, tenue le 13 janvier 1909 (**).

Considérations générales. — Avant de décrire en détail ce qui est particulier au procédé Schœnherr, nous rappellerons les principes sur lesquels reposent les procédés de fixation de l'oxygène et de l'azote de l'air atmosphérique par combinaison directe au moyen de l'arc électrique.

La formation de l'oxyde d'azote, AzO , à partir de ses éléments, est endothermique, et la formation d'une molécule-gramme de cet oxyde, soit 30 grammes, nécessite l'absorption de 21600 calories, qui doivent être fournies par une source extérieure d'énergie.

Mais il ne suffit pas de chauffer à une température suffisamment élevée un mélange d'azote et d'oxygène pour qu'il se combine totalement en oxyde d'azote. Il y a en effet une limite de teneur en oxyde qui est déterminée pour chaque température, et la proportion d'oxyde formé est d'autant plus grande que la température à laquelle le mélange est soumis est plus élevée. Ceci vient de ce que, à chaque température, une réaction inverse à la précédente tend à se produire et, si l'on chauffe pendant un temps suffisant de l'oxyde d'azote, celui-ci tend à se redécomposer en azote et oxygène.

Il s'en suit donc que si l'on chauffe un mélange d'oxygène et d'azote à une température déterminée, en laissant en présence l'oxyde formé, on arrive bientôt à un état d'équilibre, et lorsque cet état d'équilibre est atteint, les deux réactions de combinaison et de destruction se poursuivent simultanément, la quantité d'azote qui se décompose en un temps donné devenant égale à celle qui se produit pendant le même temps.

Dans un mélange en équilibre, la proportion des constituants et du corps constitué dépend à la fois de la température et de la composition initiale du mélange. La proportion d'oxyde d'azote croît très vite avec la température, ainsi que le montrent des chiffres suivants, déterminés par Nernst pour l'air atmosphérique (***) :

Température absolue en degrés C.	}	1500	1928	2202	2403	3571	2854	3103	3327
Pourcentage d'oxyde d'azote formé		}	0,1	0,5	1	1,5	2	3	4

On voit ainsi que, à 2202°, la proportion d'oxyde d'azote formé est décuple de celle obtenue à 1500°. De même, une

élévation de 428°, à partir de 1500°, ne fait passer cette proportion que de 0,1 à 0,5 pour 100, tandis que de 3103 à 3327°, une élévation à peu près moitié moindre de température élève cette proportion de 4 à 5 pour 100. Dans ce dernier cas, l'augmentation de la teneur oxyde d'azote est donc, pour une même différence de température, cinq fois plus forte que dans le premier cas.

D'autre part, la presque totalité du mélange constituant a dû être chauffée à la température de la réaction. Le calcul montre, en tenant compte de ce fait, qu'il faut, pour former la même quantité d'oxyde d'azote, fournir cinq fois plus de chaleur quand la température est de 1928° que quand elle est de 3327°. Il y a donc tout avantage à réaliser les plus hautes températures possibles, et l'emploi de l'arc électrique est tout indiqué.

Mais, même si l'on peut obtenir la température de 3000°, il ne faut pas compter attendre pratiquement la teneur de 5 pour 100 en oxyde d'azote, indiquée par les chiffres de Nernst, car la vitesse de décomposition de l'oxyde formé, égale d'ailleurs à celle de combinaison, croît aussi avec la température. Cette vitesse est 10 millions de fois plus grande à 3000° qu'à 1900°, et c'est seulement à 1500° qu'elle est pratiquement nulle, de sorte qu'il faudrait pouvoir abaisser subitement la température de 3000° à 1500°; or, la réalisation complète de ce desideratum est pratiquement impossible. On peut encore diminuer la vitesse de destruction de l'oxyde d'azote en insufflant sur l'arc de l'air en excès, car cette vitesse décroît lorsque la dilution augmente, mais on est rapidement limité dans cette voie, car l'excès de dilution devient un sérieux inconvénient pour la suite du traitement.

De la concordance établie par Nernst entre la concentration réelle en oxyde d'azote à l'équilibre, et celle calculée, on déduit que l'action de l'arc ou de l'étincelle est due à une action purement calorifique. Toutefois, au laboratoire électrochimique de Callsruhe, MM. Haber et Koenig ont atteint des concentrations supérieures à 10 pour 100, en employant un courant gazeux à pression réduite (100 mm. de mercure) qui subissait, dans un tube de quartz refroidi par de l'eau, l'action d'un arc électrique. D'après Haber, la température n'aurait pas dépassé 3000°, ce qui montrerait que, dans certains cas, un arc plus froid peut remplir avantageusement son rôle. D'ailleurs, Warburg avait déjà émis l'opinion qu'il fallait faire entrer en jeu d'autres actions que celles dues à une action purement calorifique.

On peut encore employer un autre moyen pour augmenter la teneur en oxyde d'azote, c'est de faire jaillir l'arc dans un mélange d'azote plus riche en oxygène que l'air atmosphérique; toutefois, l'augmentation que l'on peut attendre de ce procédé n'est pas bien grande, pour le moment tout au moins; en effet, pour une même température, les teneurs centésimales du mélange des gaz en équilibre sont déterminés par la relation :

$$K = \frac{C_{AzO}^2}{C_{2Az} \times C_{2O}}$$

dans laquelle C_{AzO} , C_{2Az} et C_{2O} , représentent respectivement les teneurs du mélange en oxyde d'azote, azote et oxygène. K est un coefficient dont la valeur est fixée par la température.

On voit immédiatement que la concentration en oxyde d'azote est, pour une température donnée, proportionnelle à la racine carrée du dénominateur de la fraction précédente et est maxima lorsque ce produit est lui-même maximum.

(*) *Zeitschrift für angewandte Chemie*, 31 juillet 1908.

(**) *Elektrotechnische Zeitschrift*, 22 et 29 avril 1909.

(***) Voir aussi DONY-HÉNAULT et GALL: Etat actuel de l'électrochimie, dans *La Houille Blanche* d'août 1909, page 197.

Pour l'air, ce dénominateur est égal à $0,21 \times 0,79 = 0,16$. Pour un mélange à volumes égaux d'azote et d'oxygène, il est égal à $0,50 \times 0,50 = 0,25$, et le rapport de la teneur correspondante à celle de l'air atmosphérique serait :

$$\sqrt{\frac{0,25}{0,16}} = \frac{5}{4}$$

Le bénéfice ainsi réalisé semble séduisant à première vue; toutefois, il reste faible si l'on tient compte du surcroît de dépense qui résulte de l'enrichissement en oxygène. Plus tard, peut-être, lorsque les procédés de séparation des constituants de l'air seront plus perfectionnés, on pourra employer avantageusement ce procédé.

Divers procédés ont été préconisés pour obtenir de très hautes températures, mais le seul procédé qui ait obtenu la sanction de la pratique est celui de l'arc électrique (*). Et encore, parmi les divers modes d'emploi de l'arc électrique, ce sont ceux qui sont basés sur l'emploi d'ares de très fortes intensités, absorbant de très grandes quantités d'énergie, qui ont donné des résultats industriels. La faillite du procédé de l'Atmospheric Products Co vient de ce qu'il employait de trop petits arcs, bien que ceux-ci fussent renouvelés très souvent (**). Il faut concentrer l'énergie au lieu de la disperser.

Le premier procédé réellement industriel pour la combinaison directe de l'oxygène de l'air par l'arc électrique date de 1903, et est du à MM. Birkeland et Eyde (***) , mais il présente l'inconvénient de nécessiter l'emploi d'un champ magnétique.

Procédé Schœnherr. -- A la suite de longues recherches faites à Ludwigschafen, dans les laboratoires de la *Badische Anilin und Soda Fabrik*, le Dr Schœnherr, auquel était adjoint M. Hesberger comme ingénieur-électricien, réussit à mettre au point, en 1905, son nouveau procédé de fixation de l'azote de l'air par l'arc électrique.

Au lieu d'employer un arc intermittent comme dans le procédé Birkeland et Eyde, le Dr Schœnherr utilise un arc stable, de très grande longueur, qui fonctionne sous un ampérage considérable. Cet arc, dont la longueur peut atteindre plusieurs mètres et qui, par cela même, est assez original, s'obtient de la façon suivante: Une électrode A est placée à l'intérieur, et au bas d'un tube métallique vertical B (fig. 2). Cette électrode A est reliée à l'une des bornes d'une génératrice électrique, tandis que le tube B est relié à l'autre borne de cette génératrice. Pour la sécurité du personnel, le tube B est mis à terre. Au moyen d'un dispositif spécial, décrit plus loin, on amorce l'arc entre l'électrode A et le tube B. En même temps, on insuffle de l'air par des tuyères obliques C et C'. Cet air, ainsi insufflé, se déplace dans le tube B suivant des filets en hélice, et entraîne l'arc avec lui jusqu'en D, dont la position dépend du voltage, du courant électrique et du débit de l'air. Lorsque l'état stable est atteint, l'extrémité D de l'arc se met à tourner sensiblement suivant un arc de cercle horizontal.

Par suite de la grande longueur de l'arc, on réalise une très grande surface de contact entre l'air et la flamme; en

outre, les particules d'air, dont l'azote s'est oxydé au contact de la flamme chaude, sont refroidis par la masse d'air plus froid qui l'entoure, et avec laquelle elles se mélangent rapidement par suite du mouvement tourbillonnaire qui se produit dans le tube pendant le mouvement ascendant de l'air et des gaz.

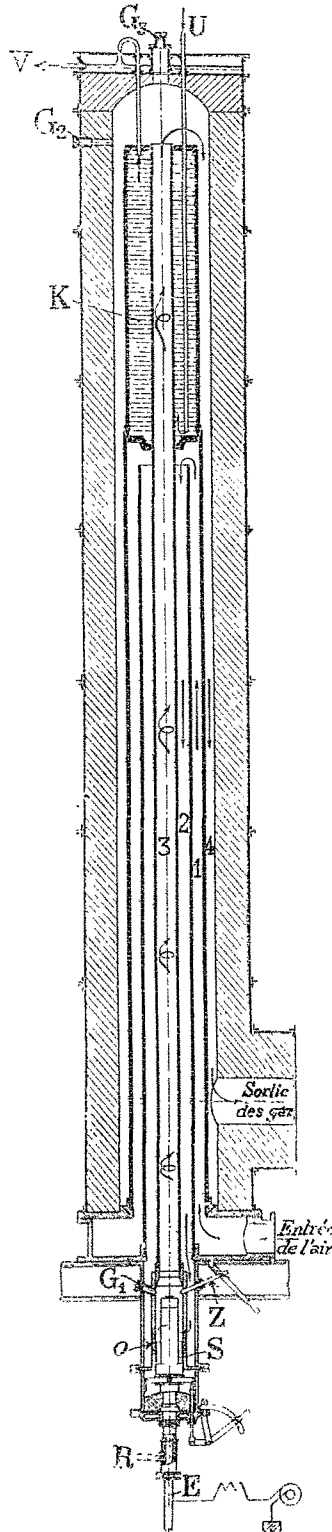


FIG. 1. — Coupe verticale du Four Schœnherr.

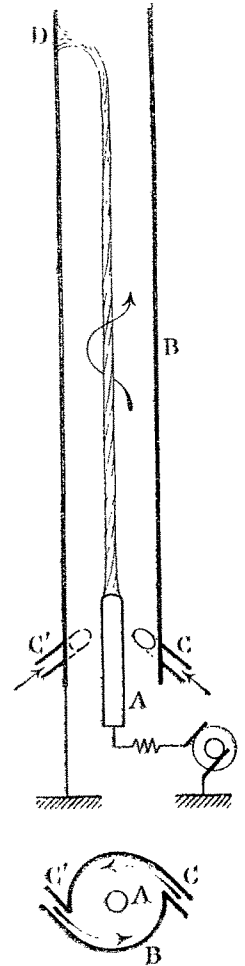


FIG. 2. Schéma du four Schœnherr.

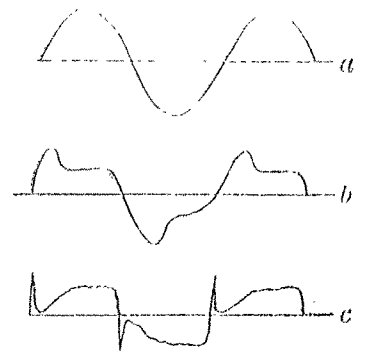


FIG. 3. Relevés oscillographiques.

L'aménagement du laboratoire de Ludwigschafen ne permettant la marche que d'un four de 300 kilowatts, la *Badische Anilin und Soda Fabrik* fit construire une usine à Christiansand, dans le sud de la Norvège. Cette usine, qui fonctionne depuis l'automne 1907, est alimentée en énergie électrique par l'usine hydro-électrique de Kringsjaa, dans le Saeterstal, qui est située à 26 kilomètres. Le transport

(*) On trouvera dans l'*Elektrotechnische Zeitschrift* du 22 avril 1909, page 366, la description sommaire d'un certain nombre de brevets pour obtention de hautes températures en vue de la production de l'oxyde d'azote.

(**) L'Appareil de l'Atmospheric Products Co produisait 414 000 petits arcs par minute. Chacun de ces arcs n'absorbait que quelques milliampères, sous 10 000 volts. L'exploitation de ce procédé a cessé en 1901.

(***) Pour la description du procédé Birkeland et Eyde, voir *La Houille Blanche* d'avril 1908, p. 79.

de l'énergie se fait sous forme de courant triphasé, sous 25000 volts. A l'arrivée, la tension est ramenée à 7200 volts entre deux phases, ce qui correspond à une tension étoilée de 4200 volts. L'usine de Christiansand peut ainsi disposer de 1300 kilowatts, puissance prévue pour alimenter normalement 3 fours de 600 chevaux. A l'heure actuelle, on essaie un four de 1000 chevaux, et l'on pense même pouvoir atteindre dans un seul four la puissance de 2000 chevaux.

La figure 1 montre en coupe les détails de construction des fours de Christiansand.

Pour amorcer l'arc, on se sert d'une tige métallique Z, qui traverse le tube B de la figure 2, et qu'on manœuvre de l'extérieur au moyen d'un levier. En approchant cette tige Z de l'électrode A, on amorce l'arc entre l'électrode A et le tube B. L'air insufflé en C fait ensuite monter cet arc jusqu'en D. Une fois en marche, l'arc n'a pas besoin d'être rallumé souvent. Il ne s'éteint que quand une variation brusque et importante vient à se produire dans l'arrivée de l'air, ou bien quand il se produit des courts-circuits sur la ligne, ou bien encore quand le voltage vient à baisser considérablement.

L'air pénètre au bas du four, monte par le tube 1, puis redescend par le tube 2, pour venir passer dans les tuyères *o*. Au sortir de ces tuyères, l'air vient au contact de l'arc dans le tube 3, puis sort à la partie supérieure de ce tube pour redescendre par le tube 4, et quitter définitivement le four à sa partie inférieure. Avec ce dispositif, on réalise une circulation méthodique. L'air s'échauffe par son passage dans les tubes 1 et 2, de sorte qu'il arrive à une température déjà élevée au contact de la flamme de l'arc. Devant les tuyères *o*, on peut déplacer un manchon S, de manière à régler le débit de l'air, ce qui, pour une même longueur de flamme et une même concentration obtenue, permet de faire varier la puissance du four dans de grandes proportions. L'ensemble des tubes 1, 2, 3 et 4 est entouré d'une garniture réfractaire, logée elle-même, dans une enveloppe cylindrique extérieure en tôle.

Dans les fours de 600 HP, l'arc atteint une longueur de 5 m.; dans celui de 1000 chevaux, il atteint 7 m. Le tube B n'est touché par l'arc sur sa longueur qu'au moment de l'allumage, et comme celui-ci n'a lieu que rarement, la durée du tube est pour ainsi dire indéfinie. Son seul point vulnérable est en D, là où l'arc vient s'épanouir; mais comme l'extrémité de l'arc tourne continuellement, et qu'en réalité il ne décrit pas un arc de cercle rigoureux, mais qu'il monte et descend quelque peu, et comme, en outre, cette partie du tube est entourée d'un réfrigérant K, le tube n'atteint jamais une très haute température, et ne subit qu'une usure insignifiante et à peine perceptible au bout de 4 mois. Le four est d'ailleurs facilement démontable, et ses différentes parties peuvent être enlevées et réparées séparément. L'eau de réfrigération de l'enveloppe K entre en U et ressort en V.

Des regards G₁, G₂ et G₃, bouchés avec des plaques de verre, permettent de voir ce qui se passe dans le tube 3. Par le regard G₃, notamment, on voit très bien tourner l'extrémité supérieure de l'arc.

Le tube dans lequel se trouve l'arc n'a pas besoin d'être cylindrique, il peut être conique; on peut même disposer le tube horizontalement, ou bien encore faire jaillir l'arc à la partie supérieure, et faire circuler l'air de haut en bas, l'arc conserve toujours sa forme stable.

L'électrode inférieure A est composée d'une tige de fer

qui se prolonge à la partie inférieure du four jusqu'en E. A son extrémité supérieure, elle est entourée d'un cylindre creux en cuivre, dans lequel circule de l'eau de réfrigération. Cette eau entre et sort en R. Au fur et à mesure que l'électrode A s'use, on la pousse à l'intérieur du four. Ce mouvement s'effectue à la main, vu la petitesse de l'usure. Une électrode dure environ 2000 heures, soit 3 mois. Lorsque celle-ci est près de sa fin, il suffit de visser une nouvelle tige à l'extrémité de la première, ce qui demande à peu près 15 minutes. La dépense en électrodes n'est, par suite, que de quelques centimes par kilowatt-an.

Comme à leur sortie du four les gaz nitreux ont une température assez élevée, environ 850°, ils sont envoyés dans une chaudière dont ils échauffent l'eau. La vapeur produite par cette chaudière sert à la concentration des solutions de nitrates.

Le bilan thermique du four Schœnherr peut s'établir ainsi: 40 % de la chaleur correspondant à l'énergie fournie au four est absorbée par l'eau de réfrigération du four, 30 % sont abandonnés aux chaudières par les gaz chauds, 17 % sont perdus par radiation et conductibilité, 10 % sont absorbés par réfrigération dans les diverses opérations auxquelles sont soumis les gaz après leur passage aux chaudières, de sorte qu'il n'y a que 3 % de la chaleur fournie qui soit utilisée pour la production de l'oxyde d'azote.

On a cherché, au moyen d'électrodes auxiliaires, intercalées sur le parcours de l'arc, à se rendre compte comment se répartissait la chute de tension. On a constaté que cette chute de tension se faisait très régulièrement tout le long de l'arc. De même, des prises, faites en divers points du tube 3, ont montré que la teneur en oxyde d'azote s'accroît vers le milieu de l'arc et à sa partie supérieure.

Les relevés oscillographiques de l'intensité et de la tension du courant absorbé dans les fours Schœnherr ont donné des courbes presque sinusoïdales, ainsi que le montrent les courbes *a* de la figure 3. La courbe *b* est celle d'une lampe à arc ordinaire, tandis que la courbe *c* est celle qu'on obtient avec les fours Birkeland et Eyde. Il résulte de ce fait que les circuits électriques sont moins sujets aux surtensions dans le procédé Schœnherr que dans le procédé Birkeland. Le facteur de puissance est en outre plus élevé, et atteint ici jusqu'à 0,96.

Exploitation du procédé Schœnherr. — Une fois l'oxyde formé, il faut le refroidir pour le transformer d'abord en peroxyde d'azote, puis en acide azotique et en azotate.

La transformation de l'oxyde d'azote AzO en peroxyde AzO², par fixation d'oxygène pris à l'air en excès, commence à partir de 600°, mais elle n'est complète qu'à partir de 140°. Elle nécessite d'ailleurs un temps d'autant plus considérable que la température est plus élevée, et la teneur en oxyde d'azote plus faible. A 20°, et pour une teneur de 2 % d'oxyde d'azote, il faut 12 secondes pour transformer 50 % de cet oxyde, tandis qu'il faut 100 secondes pour en transformer 90 %.

Ceci montre l'avantage considérable qu'il y a à obtenir des vapeurs nitreuses concentrées, car, au-dessous d'une certaine teneur, il devient pratiquement impossible de réaliser une transformation complète; elle exigerait à la fois un temps et un espace prohibitifs, et cela diminue encore le faible rendement trouvé précédemment.

En traitant le peroxyde d'azote par les alcalis, on obtient un mélange par parties égales de nitrate et de nitrite alcalins. Ce mélange peut s'employer tel quel en agriculture,

les objections que l'on a formées contre les nitrites alcalins, qui sont plus riches en azote que les nitrates, ne reposant sur aucun fondement. Toutefois, l'emploi de la soude s'interdit à cause de son prix et, d'autre part, celui de la chaux exclut les tours d'absorption à ruissellement dont on se sert habituellement, car leurs espaces vides seraient rapidement obstrués. On a cependant réussi à employer la chaux en prenant certaines précautions spéciales. C'est ainsi que M. Schløsing a fait breveter un procédé de fixation à chaud des gaz nitreux par des briquettes de chaux calcinée, dans lesquelles le nitrite se transforme de lui-même en nitrate.

On pourrait aussi transformer en nitrite tout l'oxyde d'azote formé, en laissant de l'oxyde d'azote non transformé dans le peroxyde d'azote, mais cette transformation ne serait pas avantageuse, car la consommation mondiale des nitrites est assez faible, et 12 000 chevaux y suffiraient à eux seuls.

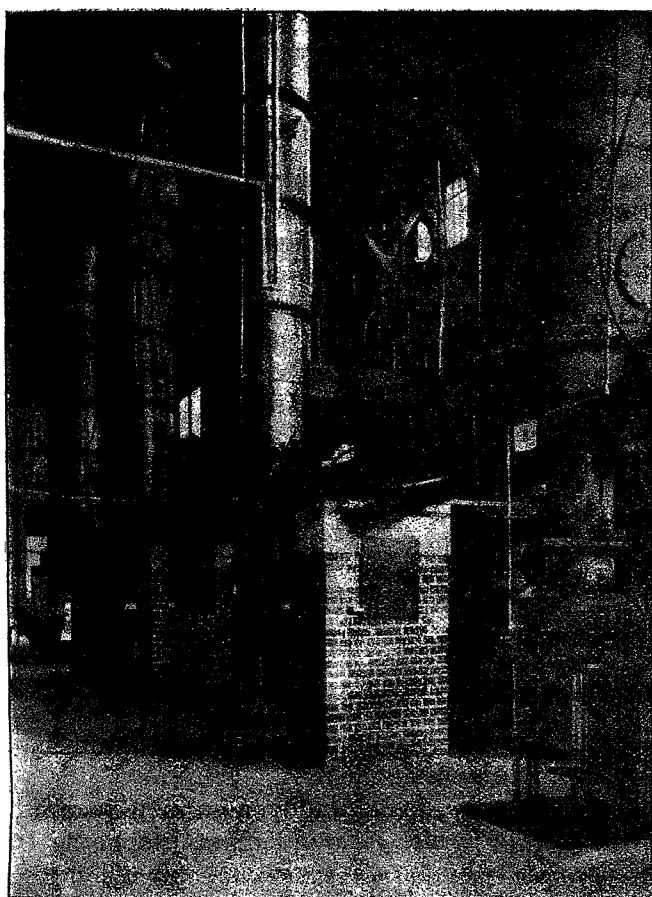


FIG. 4. — Vue de la salle des fours de 600 HP de l'usine de Christiansand.

Le peroxyde d'azote mis en contact avec de l'eau se transforme de lui-même en acide azotique étendu, d'une teneur inférieure à 40 %, mais il se reforme en même temps de l'oxyde d'azote. Avec adjonction d'acide sulfurique, la réaction se fait rapidement, il se forme de l'acide azotique et de l'acide nitrosylsulfurique, malheureusement on n'est pas encore en état de récupérer les gaz nitreux de cet acide dont l'emploi est à peu près nul. On peut encore transformer le peroxyde d'azote en acide nitrique, sans retour à l'oxyde d'azote, par l'emploi de l'ozone, mais ce procédé n'a pas encore reçu la consécration de la pratique industrielle.

Une fois l'acide azotique dilué obtenu, on peut concentrer celui-ci par les moyens ordinaires, si l'on a en vue la

fabrication de cet acide, ou bien on le met en contact avec du carbonate de chaux pour former du nitrate de chaux. La solution étendue de nitrate de chaux ainsi obtenue est concentrée au moyen de la vapeur produite par les gaz chauds venant des fours à oxyde d'azote, puis concassée et mise en tonneaux. C'est le procédé employé en grand à Notodden, où l'on fabrique ainsi le *nitrate de Norvège*, à 13 % d'azote.

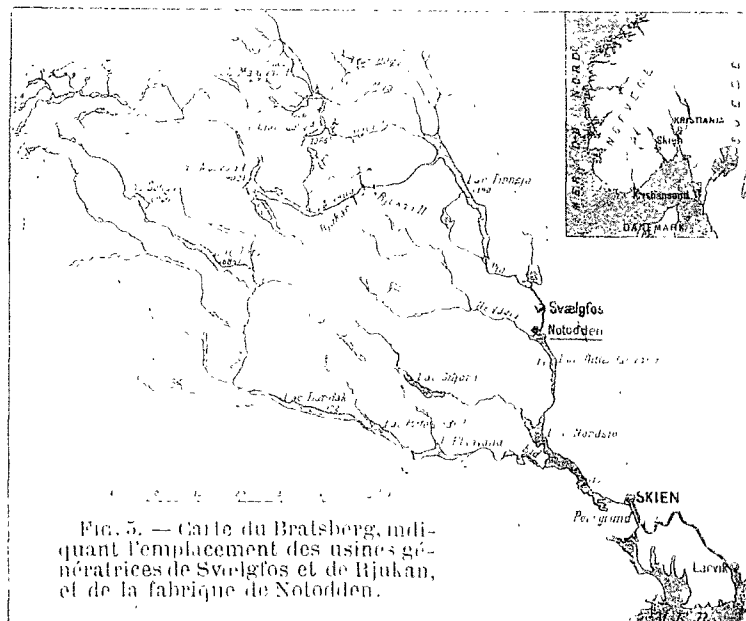


FIG. 5. — Carte du Bratsberg, indiquant l'emplacement des usines génératrices de Svalgfos et de Rjukan, et de la fabrique de Notodden.

La *Badische Anilin und Soda Fabrik* a formé un consortium avec deux autres sociétés allemandes : la *Elberfelder Farbenfabrik* et la *Allgemeine Gesellschaft für Anilinfabrikation*, de Berlin, ainsi qu'avec la *Société norvégienne de l'Azote*, de Notodden, en vue de l'exploitation des chutes de la Norvège pour la fabrication des nitrates. Ce consortium, constitué en vue d'empêcher la concurrence sur le marché du nitrate, exploite actuellement le procédé Birckeland et Eyde concurremment avec le procédé Schœnherr, mais, dans quelque temps, lorsque l'expérience aura suffisamment montré lequel de ces deux procédés est le plus avantageux, c'est ce procédé seul qui sera employé.

Le consortium précité a créé trois sociétés filiales : la *Société norvégienne de Forces*, pour la production de l'énergie électrique, la *Société norvégienne des Usines nitratifères*, pour la fabrication des produits azotés, et la *Société norvégienne de Transports*, chargée d'établir une voie de communication entre les usines et Skien. La distance entre ces deux points est de 138 km. environ. Elle est franchie au moyen d'une première ligne de chemin de fer de 16 km., aboutissant au lac Tinnsjo, d'un service de ferry-boats traversant ce lac dans sa longueur (31 km.), d'une seconde ligne de chemin de fer de 31 km., aboutissant à Notodden, sur le lac d'Hitlerdal, et enfin d'une ligne de bateaux réunissant Notodden à Skien (60 km.).

Ces lignes de chemin de fer et de bateaux sont entrées en exploitation depuis le mois d'août 1909. Bien que leur objet principal soit d'effectuer les transports de matières premières et de produits fabriqués pour la Société de l'Azote et ses filiales, elles assurent aussi le service public des voyageurs et des marchandises.

La *Société norvégienne de Forces* aménage actuellement les célèbres chutes du Rjukan. Ces chutes, dont la hauteur totale est de 560 mètres, seront utilisées en deux étages à peu près égaux. Comme le débit est de 40 m³, la puissance

totale sera de 225 000 chevaux. La première chute, que l'on compte mettre en marche au début de 1911, contiendra dix groupes électrogènes de 14 000 chevaux chacun. Cette Société s'est en outre assuré la propriété des chutes de Matre (89 000 HP) et de Tyn (78 000 HP), de sorte que, à un moment donné, elle pourra disposer, en Norvège, de 400 000 chevaux pour la fabrication des nitrates.

D'autre part, la *Badische Anilin* a demandé la concession des chutes de l'Alz, dans la Haute-Bavière, de 50 000 chevaux, pour exploiter son procédé en Allemagne (*).

Si l'industrie des nitrates a besoin de forces énormes à bon marché, à cause du faible rendement thermique des fours électriques, elle n'a pas, par contre, à s'inquiéter de la matière première, car la mine à laquelle elle s'approvisionne est aussi inépuisable que peu coûteuse.

P. PIERRON, *Docteur ès-Sciences,*
Professeur à l'Institut de Chimie de Lyon.

AMÉNAGEMENT DES CHUTES

CALCUL DU DIAMÈTRE ÉCONOMIQUE DES CONDUITES FORCÉES

Le calcul des conduites forcées présente une grande importance dans l'établissement des projets d'usines hydrauliques. Cette importance est d'autant plus grande que la chute est plus haute et la conduite plus longue. On constate souvent dans ce cas que la dépense engagée par l'achat des conduites est l'article le plus élevé du devis d'aménagement: Il importe donc de serrer ce calcul de très près, et de choisir le diamètre qui conduit à la solution la plus économique.

Le plus souvent, cependant, on se fixe plus ou moins arbitrairement la valeur de la perte de charge ou de la vitesse à réaliser, et on en déduit le diamètre au moyen des formules connues (Darcy, Lévy, Flamant, etc.). Il est de toute évidence que cette méthode présente une grande part d'arbitraire, de sorte qu'elle ne conduit qu'exceptionnellement à la solution la plus économique. On voit, en effet, qu'une diminution de diamètre restreint sensiblement les frais d'établissement, et par suite les charges annuelles d'intérêt et d'amortissement, mais comme elle correspond à une diminution de la puissance disponible, on peut prévoir qu'il doit exister une combinaison du diamètre et de la vitesse plus économique que toutes les autres. C'est précisément cette combinaison que nous nous proposons de déterminer.

Nous chercherons d'abord à exprimer le poids moyen du mètre linéaire de tuyau en fonction du diamètre D et de la hauteur de chute H .

On sait que, pour un diamètre donné, l'épaisseur croît proportionnellement à la charge et que, pour une charge donnée, elle augmente proportionnellement au diamètre. Il résulte de là que le poids moyen du mètre linéaire est une fonction parabolique de la forme :

$$p_m = k I D^2 \quad (1)$$

k étant un coefficient numérique qui dépend à la fois du taux de travail admis pour le métal, du poids spécifique du

tuyau, de la largeur des recouvrements, et de l'importance des brides d'assemblage.

Pour les tuyaux en acier couramment employés, et pour un taux de travail de 7 kg. par m/m², on a sensiblement :

$$k = 1,3$$

Si L est la longueur de la conduite, son poids total sera donc :

$$p = 1,3 H D^2 L \quad (2)$$

(Cette formule suppose implicitement que l'inclinaison de la conduite est uniforme, condition à peu près réalisée dans la plupart des installations).

Recherche de la solution la plus économique. — Soit N le nombre d'heures de fonctionnement prévu par année. La puissance recueillie sera par an, en chevaux-heure :

$$P = N P'$$

P' étant la puissance moyenne en chevaux disponible aux bornes de l'usine.

Soit v le prix de vente du cheval an aux bornes de l'usine. La recette annuelle sera donc :

$$R = v N P' \quad (3)$$

Quant aux dépenses elles comprennent :

1° Une partie fixe M , indépendante de la conduite forcée (intérêts et amortissements du reste de l'installation).

2° Une partie variable X provenant de l'intérêt et de l'amortissement de la conduite.

Si nous appelons f le prix en francs de la tonne d'acier, et t le taux d'amortissement et d'intérêt par franc, cette partie variable aura pour expression :

$$X = a D^2 \quad (4)$$

en posant : $a = 1,3 H L t f \quad (5)$

et la dépense annuelle sera :

$$M + X = M + 1,3 H D^2 L t f$$

Les bénéfices annuels seront donc :

$$B = v N P' - (M + 1,3 H D^2 L t f) \quad (6)$$

La solution la plus économique sera évidemment celle qui rendra maxima ces bénéfices.

Nous appellerons q le débit moyen en mètres cubes, h la perte de charge brute, ρ le rendement global de l'usine seule.

L'expression de la puissance moyenne sera alors :

$$P' = \frac{1000}{75} Q (H-h)\rho$$

Nous pourrions, en première approximation tout au moins, poser $\rho = 0,75$, ce qui nous conduit à la forme simple bien connue :

$$P' = 10 Q (H-h) \quad (7)$$

Il nous reste à exprimer h en fonction des données précédemment admises. Nous nous servirons pour cela de la relation suivante, qui donne la perte de charge J par mètre de tuyau :

$$J = 0,00243 \frac{Q^2}{D^5} \quad (8)$$

Cette relation équivaut à la formule monôme :

$$D = 0,3 \sqrt[5]{\frac{Q^2}{J}}$$

(*) Le débit dérivé serait de 60 m³, et la chute aurait environ 100 m. de hauteur, la puissance maxima serait ainsi de 60 000 chevaux. Comme le débit d'étiage tombe à 20 m³, on se propose de créer un réservoir important, en utilisant le lac Chiemsee.