

**Zeitschrift:** Bulletin des Schweizerischen Elektrotechnischen Vereins  
**Herausgeber:** Schweizerischer Elektrotechnischer Verein ; Verband Schweizerischer Elektrizitätswerke  
**Band:** 14 (1923)  
**Heft:** 10

**Artikel:** L'azote et l'énergie électrique en Suisse  
**Autor:** Jaques, R.A.  
**DOI:** <https://doi.org/10.5169/seals-1060394>

### Nutzungsbedingungen

Die ETH-Bibliothek ist die Anbieterin der digitalisierten Zeitschriften auf E-Periodica. Sie besitzt keine Urheberrechte an den Zeitschriften und ist nicht verantwortlich für deren Inhalte. Die Rechte liegen in der Regel bei den Herausgebern beziehungsweise den externen Rechteinhabern. Das Veröffentlichen von Bildern in Print- und Online-Publikationen sowie auf Social Media-Kanälen oder Webseiten ist nur mit vorheriger Genehmigung der Rechteinhaber erlaubt. [Mehr erfahren](#)

### Conditions d'utilisation

L'ETH Library est le fournisseur des revues numérisées. Elle ne détient aucun droit d'auteur sur les revues et n'est pas responsable de leur contenu. En règle générale, les droits sont détenus par les éditeurs ou les détenteurs de droits externes. La reproduction d'images dans des publications imprimées ou en ligne ainsi que sur des canaux de médias sociaux ou des sites web n'est autorisée qu'avec l'accord préalable des détenteurs des droits. [En savoir plus](#)

### Terms of use

The ETH Library is the provider of the digitised journals. It does not own any copyrights to the journals and is not responsible for their content. The rights usually lie with the publishers or the external rights holders. Publishing images in print and online publications, as well as on social media channels or websites, is only permitted with the prior consent of the rights holders. [Find out more](#)

**Download PDF:** 16.02.2026

**ETH-Bibliothek Zürich, E-Periodica, <https://www.e-periodica.ch>**

des chiffres fournis par la théorie simplifiée. Par conséquent nous nous dispenserons d'étendre la théorie exacte au cas général d'un canton formé de plusieurs portées quelconques. D'après le tableau V on voit d'ailleurs que l'augmentation de flèche devient de moins en moins sensible à mesure que le nombre de portées entre points fixes croît; le cas le plus défavorable, partant le plus intéressant, est donc celui de deux portées seulement: Le tableau précédent montre qu'il faut compter avec une augmentation de flèche de 25% environ dans la portée où subsiste la surcharge. La longueur des chaînes d'isolateurs a une légère influence, en ce sens que les longues chaînes permettent une déviation plus grande, donc une variation de flèche un peu plus importante que les petites, surtout dans les grandes portées.

En appliquant le mode de calcul ci-dessus à un câble de bronze de 50 mm<sup>2</sup> de section et en supposant aussi une surcharge de neige de 2 kg/m, nous avons obtenu une augmentation de flèche comprise entre 20 et 30 % pour des portées allant de 100 à 300 m. En revanche un câble de 134 mm<sup>2</sup> de section n'est plus sujet à d'aussi fortes variations de flèche; toutes choses égales d'ailleurs, l'écart atteint ici 12 à 18 % seulement. Un câble de 262 mm<sup>2</sup> enfin apparaît moins sensible encore à une répartition inégale de la surcharge, puisque sa flèche n'augmente que de 7 à 13 % dans les mêmes conditions.

Bien qu'une surcharge accidentelle influence d'autant moins la tension et par suite la flèche d'un câble aérien que la section de celui-ci est plus grande et qu'il est soumis à une sollicitation plus forte, il n'en demeure pas moins que les lignes de faible section ou en métal tendre (aluminium) courrent le risque de subir d'importantes variations de flèche en cas de répartition inégale d'une surcharge de neige ou de verglas. A l'usage de ces dernières lignes — et quitte à se montrer moins sévère vis-à-vis des gros câbles de bronze et d'aluminium-acier — il semble donc justifié de tirer la conclusion pratique suivante des constatations qui précédent:

*Dans les croisements aériens, si la ligne croisante est suspendue à des chaînes d'isolateurs, il faudrait autant que possible la tendre assez loin de la ligne croisée pour que sa distance à celle-ci ne descende pas au dessous du minimum prescrit, même si la flèche prévue à 0° et avec surcharge de neige est majorée d'un quart de sa valeur.*

## L'azote et l'énergie électrique en Suisse.

Par R. A. Jaques, ingénieur, Lausanne.

*Der Autor bespricht verschiedene Methoden der Herstellung von Stickstoffdüngmitteln unter Anwendung von elektrischer Energie. Er errechnet an dem Beispiel einer Fabrik, die jährlich 3500 Tonnen Stickstoff verarbeitet, die ungefähren Herstellungskosten der verschiedenen Stickstoffverbindungen und kommt zu dem Schluss, dass in der Schweiz solche Verbindungen nur mit Aussicht auf Erfolg hergestellt werden können, wenn die elektrische Energie zu höchstens Fr. 150.— pro kW Jahr erhältlich ist. Der Strom kann dabei nicht reiner Abfallstrom sein.*

*L'auteur donne un aperçu des différentes méthodes pour la fabrication des engrais nitrages nécessitant une grande quantité d'énergie électrique. Il compare les prix de revient qu'on peut réaliser avec les différents procédés en prenant comme base une usine fixant 3500 tonnes d'azote par an et conclut qu'une industrie de ce genre ne pourrait avoir chance de réussir en Suisse qu'à condition que le kW an ne couté pas plus de fr. 150.— et que l'énergie soit fournie d'une manière régulière.*

Quiconque en Suisse a suivi les progrès de l'industrie électrochimique et spécialement ceux de l'industrie des produits nitrés doit se demander:

1<sup>o</sup> Est-il possible de faire de notre pays un gros producteur de synthétiques nitrés ou nitriques?

2<sup>o</sup> Celui qui se lance dans cette voie peut-il s'attendre à voir son entreprise couronnée de succès?

Possible, la chose l'est sans aucun doute. Les dizaines de mille kW que nous exportons au-delà de nos frontières pour motifs de force majeure suffiraient à eux

seuls à la marche d'une usine importante de synthèse nitrique; les compétences techniques, chimistes, constructeurs, électriciens, mécaniciens ne sont pas près de faire défaut chez nous; les capitaux qui sommeillent dans nos établissements de crédit ne resteraient certainement pas en arrière.

Que l'entreprise soit profitable voilà qui n'est pas aussi certain. Le rendement commercial, le bénéfice matériel qui seul entre en compte dès qu'il s'agit de mettre en ligne des capitaux est une variable qui dépend de tant de circonstances diverses qu'il faut serrer la question de près avant de pouvoir y répondre avec un taux d'erreur réduit au minimum.

### I. Produits nitriques et nitrés synthétiques.

Les acides et engrais de synthèse sont restreints en nombre.

Les deux formes véhiculaires de l'azote, sont au point de vue industriel:

l'acide nitrique en solution . . . . .	36° Bé.	contenant, en poids, environ 11,5 % N <sup>2</sup>
l'acide nitrique en solution . . . . .	40° Bé.	" " " 13,6 % N <sup>2</sup>
l'acide nitrique en concentration . . . . .	48,5° Bé.	" " " 21,95 % N <sup>2</sup>
l'ammoniaque en solution . . . . .	20-23° Bé.	" " " 18,1 % N <sup>2</sup>

L'industrie préfère les acides concentrés à 99,5 % de NO<sup>3</sup>H plus commodes pour la nitration des carbures cycliques; les frais de transport se réduisent au minimum par unité de NO<sup>3</sup>H (ou de N<sup>2</sup>) contenue dans le produit; l'encombrement des stocks diminue en proportion inverse de la concentration en monohydrate.

Les engrais nitrés de synthèse sont:

le nitrate de chaux . . . . .	tenant en azote <sup>1)</sup>	13 %
le nitrate de soude . . . . .	" " " <sup>1)</sup>	15,5 %
la cyanamide de chaux . . . . .	" " " <sup>1)</sup>	18-21 %
le sulfate d'ammoniaque . . . . .	" " " <sup>1)</sup>	20 %
le sulfo-nitrate d'ammoniaque dit Mischsalz	" " " <sup>1)</sup>	27,5 %
le nitrate d'ammoniaque . . . . .	" " " "	35 %
l'urée . . . . .	" " " "	46,6 %

Il va sans dire qu'un choix judicieux s'impose non seulement entre les procédés de synthèse nitrique mais encore entre les divers produits et engrais chimiques qui figurent ci-dessus.

Les expériences que nous avons faites pendant la guerre concluent formellement en faveur de notre plus grande indépendance économique ou tout du moins en faveur des tentatives de quelque provenance, de quelque nature et dans quelque domaine que ce soit de notre vie économique nationale qui diminueront d'abord l'ingérence de l'étranger dans nos affaires industrielles, ensuite nos importations en matières premières, spécialement en combustibles minéraux.

Nous sommes propriétaires d'une réserve d'azote atmosphérique égale à autant de fois  $0,755 \times 1033$  grammes que notre pays compte de centimètres carrés de superficie ( $41\,346 \times 10^{10}$ ) soit environ  $321 \times 10^9$  tonnes! Les kW, nous savons déjà où ils sont immédiatement récupérables.

En tenant compte de ce que nous possédons et des conditions dans lesquelles nous devrions le mettre en valeur, je passerai aux procédés.

### II. Procédés de fixation de l'azote.

#### 1<sup>o</sup> Procédé à l'arc.

a) *Installation norvégienne.* Le procédé à l'arc est le plus ancien en date des procédés exploités industriellement. La première usine norvégienne d'Arendal date de 1904; six ans après, l'usine de Rjukanfös apportait le concours de ses 140 000 HP, ce qui fait avec les installations construites entre-temps plus de 200 000 HP

<sup>1)</sup> Teneur du produit commercial.

mis au service du procédé à l'arc. Ces usines ont bénéficié dès leurs débuts d'une véritable politique de l'énergie électrique *inconnue partout ailleurs*.

Le rendement est malheureusement faible. La moyenne entre les systèmes Pauling, Birkeland-Eyde, Schönherr est de 69,33 grammes de monohydrate par kWh. On est encore bien loin de la limite théorique de 264 grammes !

Au sortir des fours, les vapeurs nitreuses passent dans une chaudière puis dans un réfrigérant et de là dans la chambre d'oxydation. Le peroxyde formé circule dans une suite de tours d'absorption dont le volume d'emplissage doit être de 250 à 320 m<sup>3</sup> par tonne d'azote fixé et par heure.

On peut ainsi se rendre compte de la dimension que prennent les tours d'absorption dès qu'il s'agit d'une usine de quelque importance et les frais de construction qui en résultent.

85 % environ du NO initial est transformé successivement dans les tours; il est collecté devant la première tour acide en solution à 50 % de monohydrate, le reste, sauf 3 à 5 % de pertes est fixé dans les tours de queue ou tours alcalines par le carbonate de soude et recueilli en nitrate de soude.

Du collecteur d'acide brut à 50 % NO<sup>3</sup>H, une partie de celui-ci est dirigé dans les bacs de neutralisation par CO<sup>3</sup>Ca, évaporé et concentré avec emploi de la vapeur fournie par les chaudières. Après solidification de la solution, le nitrate de chaux est broyé, tamisé et mis en silo pour l'emballage. Il s'agit donc d'une usine-annexe à celle de la fixation proprement dite de l'azote, installation dont l'importance et le coût ne sont pas négligeables. Il en est à peu près de même quant au traitement de la solution de nitrate de soude pour lequel il faut en plus des essoreuses centrifuges.

On peut bien entendu affecter toute la production d'acide à la fabrication de l'engrais ou à la concentration.

Ce qui reste de NO<sup>3</sup>H est envoyé à la concentration. Cette opération s'effectue par l'acide sulfurique 66° Bé.; une distillation à basse température sépare NO<sup>3</sup>H presque pur que l'on recueille par condensation. Le poids d'acide sulfurique nécessaire est considérable: de 5 à 7 fois celui du NO<sup>3</sup>H à 50 %.

Les installations requises pour l'exploitation du procédé à l'arc sont très volumineuses, car il faut traiter une masse énorme de vapeurs nitreuses à très faible concentration. Il faut pour la fabrication de l'acide à 99,5 % de monohydrate 12 tonnes SO<sup>4</sup>H<sup>2</sup> pour tonne d'acide nitrique fort.<sup>2)</sup>

b) *Nitrate de chaux, procédé à sec.* Le procédé à sec, ou procédé Schlöesing, consiste à absorber directement dans des chambres remplies de chaux vive les vapeurs nitreuses sorties des fours. Ces chambres, montées en série sont traversées par le courant gazeux à une vitesse déterminée; un jeu de registres permet d'isoler celles où la saturation est achevée en mettant en circuit une autre chambre fraîchement remplie de CaO. Le nitrate obtenu ainsi est de belle qualité, exempt de nitrite. Malheureusement, il faut évacuer l'engrais avec la pelle, travail repoussant et malsain qui a jeté sur le procédé Schlöesing un discrédit bien compréhensible. Il serait certainement possible d'assurer le vidage des chambres par des moyens mécaniques appropriés. Certains types d'appareils à peu près identiques (à la dimension près des chambres) ont été brevetés dernièrement.

Cette méthode de réaction des gaz nitreux ne nécessite en fait de matières premières importées que le combustible requis pour la décarbonatation du calcaire<sup>3)</sup>. Elle a l'avantage de supprimer près de 30 % des installations décrites sous 1<sup>o</sup> a) pour la même production de nitrate-engrais.

c) *Condensation physique des gaz nitreux.* Part faite des réserves que l'on est en droit de formuler au sujet de la sûreté d'opération d'un procédé dont on

<sup>2)</sup> L'acide est de nouveau retiré du sulfonitrique; un appoint d'acide frais suffit après chaque opération, de sorte que la quantité première d'acide à mettre en œuvre peut être passée au compte frais du premier établissement.

<sup>3)</sup> De 165 à 200 kg de combustible par tonne de chaux, suivant les fours.

ne connaît que des résultats semi-industriels, c'est bien le système Guye-Gros & Boudhardy (Société de l'Azote français, usine de la Roche-de-Rame, 3000 kW) qui présente à l'heure actuelle le plus grand intérêt au point de vue perfectionnements techniques et rendement du procédé à l'arc. On arrive à fixer 90 grammes de  $\text{NO}_3\text{H}$  par kWh.

Les vapeurs nitreuses ne sont plus absorbées chimiquement. A leur sortie des fours, elles traversent les chaudières, puis sont condensées physiquement par le froid;  $\text{N}_2\text{O}_4$  est recueilli sous forme solide à très basse température. Les fours sont alimentés avec ce qui n'a pas été absorbé de vapeurs nitreuses et avec de l'air suroxygéné. La condensation physique se fait au moyens d'échangeurs de température; tout l'ensemble travaille en circuit fermé. L'appoint de frigories est assuré par une machine à éthylène liquide; le transport des frigories se fait par l'intermédiaire d'un gaz inerte. Quoique le peroxyde d'azote n'attaque pas les métaux et que l'on puisse rendre le système de circulation parfaitement étanche, il a fallu éviter tout contact possible entre un corps nitrant énergique et un hydrocarbure dont la combinaison inopinée pourrait engendrer une catastrophe. Les usines de Zschornewitz (Prusse) et de Bodio (Tessin) qui opéraient d'après un procédé similaire ont sauté par suite de l'immersion directe des canalisations dans un hydrocarbure à basse température.

Par l'oxygène (plus exactement l'ozone) et la pression, on obtient l'acide 99,5 % de  $\text{NO}_3\text{H}$ , après échauffement du peroxyde à  $-11^{\circ}\text{C}$ .

Cette utilisation nouvelle de l'oxydation nitrique à l'arc présente à première vue d'énormes avantages: réduction du volume des installations de traitement des vapeurs nitreuses au 20 % environ de ce qu'elles sont pour 1<sup>o</sup> a). Les frais de premier établissement s'ils ne subissent pas la même diminution semblent devoir être relativement réduits, malgré un appareillage toujours délicat dès qu'il s'agit de froid et de pression.

S'il était possible de trouver emploi de la vapeur fournie par les chaudières que traversent les gaz à leur sortie des fours, on aurait en mains un procédé de fabrication d'acide nitrique<sup>4)</sup> concentré intéressant pour notre pays. Il se prête en effet mieux que tout autre à la dissémination de petites installations susceptibles de travailler avec du courant de déchét ou de répartir leur temps de marche en dehors des heures de pointes de façon à bénéficier d'énergie à bon marché.

## 2<sup>o</sup> Procédé à la cyanamide.

Parler ici de la fabrication du carbure serait déplacé. Nous sommes au nombre des plus vieux „carburiers“. Tout au plus le passage du carbure à la cyanamide pourrait-il prêter à discussion au sujet du mode d'azotation: fabrication à la charge (Frank-Caro, S. P. A.) ou continue (Polzenius et imitations). Chacun a ses partisans. Au point de vue de l'organisation industrielle, si importante de nos jours, on peut opter pour la fabrication continue: four horizontal, four tunnel, ou four vertical semblable à ceux que l'on utilise pour le grillage des pyrites dans les usines d'acide sulfurique.

La cyanamide est malaxée avec de l'eau froide et addition de carbonate de soude qui augmente la vitesse de transformation et empêche la polymérisation de la cyanamide  $\text{CN}_2\text{H}_2$  dont l'engrais est le sel de chaux. La bouillie est introduite dans un autoclave avec de la vapeur à 3 kg que la réaction exothermique fait monter à 10–12 kg. L'ammoniaque-gaz se dégage, contenant des impuretés qu'un lavage avec  $\text{NaOH}$  retient. 79 à 81 % de l'azoté sont transformés en  $\text{NH}_3$ . Il peut être dissous dans l'eau pour obtenir la solution commerciale à 20–22<sup>o</sup> Bé. ou passé à l'atelier d'oxydation.

L'oxydation catalytique du gaz  $\text{NH}_3$  dont le rendement est approximativement de 0,95<sup>o</sup> fournit, dans les appareils les plus récents, des gaz nitreux dont la teneur est pratiquement de 9 % de  $\text{NO}$  contre 1 à 2 % pour les vapeurs sortant des fours

<sup>4)</sup> Probablement aussi de nitrate de chaux à partir de l'acide  $\text{NO}_3\text{H}$  étendu.

à arc. Le passage en  $\text{NO}^3\text{H}$  exige identiquement le même appareillage que nous avons décrit sous 1<sup>o</sup> a), à celà près que la production est plus forte par unité de volume des tours d'absorption et que la limite de concentration de  $\text{NO}^3\text{H}$  ou 35<sup>o</sup> Bé. est plus facilement atteinte.

On conçoit qu'il n'est pas question de fabriquer du nitrate de chaux à 13 % de  $\text{N}^2$  en traitant la cyanamide qui titre de 18 à 21 % de  $\text{N}^2$ ; ce serait en pure perte.

Les deux produits intéressants à partir de ce procédé sont l'acide et l'ammoniaque. C'est presqu'exclusivement à la production d'acide nitrique que la cyanamide est destinée hormis son emploi direct comme engrais.

Basé sur la transformation de la cyanamide, ce procédé est donc solidaire de l'importation de combustible nécessaire à la préparation du carbure. La vapeur exigée pour les autoclaves demande un nouvel appont de coke<sup>5)</sup> ou de houille, à moins que l'on ne préfère monter des générateurs de vapeur chauffés par l'électricité.

L'ammoniaque a plusieurs débouchés assurés: la fabrication de la soude Solvay; celle du sulfate d'ammoniaque et de l'urée.

Les prix de revient de  $\text{NH}^3$  en solution commerciale sont soumis aux variations du marché du carbure. C'est une sujexion qu'il ne faut pas perdre de vue.

### 3<sup>o</sup> Synthèse directe de l'ammoniaque.

Ce procédé aurait mérité de figurer en tête de cette étude en raison de son importance actuelle au point de vue de la production industrielle qu'il assure déjà et des avantages indiscutables qui sont les siens, dans les pays pour lesquels il a été, en quelque sorte, conçu et adapté.

„L'électrification“, pour employer un terme en vogue, d'une partie de ce procédé constituerait une innovation qui peut sembler au premier abord presque téméraire. La synthèse de  $\text{NH}^3$  par le procédé Haber-Bosch ou Claude<sup>6)</sup> ne relève pas de réactions électrochimiques. Part faite de ce que l'air et l'eau consomment d'énergie électrique pour compression ou pompage, les éléments  $\text{N}^2$  et  $\text{H}^2$  sont fournis par les combustibles solides: houille-coke et lignites. C'est le coke qui fournit le gaz à l'eau, source d'hydrogène et le gaz à l'air, source d'azote (2 volumes gaz à l'eau pour 1 volume gaz à l'air).

La gazéification des combustibles inférieurs fournit la force motrice nécessaire à la préparation du mélange, première phase de la fabrication.

Cette première phase exige la mise en œuvre d'un appareillage et d'une machinerie énormes. Environ 5/9 de l'énergie mécanique requise pour l'ensemble de la fabrication sont absorbés par la préparation des gaz. Gaz à l'air et gaz à l'eau sont mélangés dans des échangeurs avec appont de vapeur d'eau pour oxyder  $\text{CO}$  en  $\text{CO}^2$ ; cette opération catalytique laisse dans le mélange un reste de  $\text{CO}$  libre. On élimine  $\text{CO}^2$  et  $\text{CO}$  restants, aussi complètement que possible pour ne pas avarier la masse de contact en présence de laquelle s'effectue la synthèse de  $\text{N}^2 + 3 \text{H}^2$ ;  $\text{CO}^2$  est retenu presque totalement par dissolution dans l'eau (pression 25 atm.) Le reste des impuretés est absorbé sous la pression de synthèse (200 atm.) par l'eau également;  $\text{CO}$  est éliminé par une solution ammoniacale de formiate de cuivre. Le gaz  $\text{CO}^2$  n'est pas perdu: il sert à la fabrication de la soude Solvay, annexée à l'usine d'ammoniaque.

L'ensemble des machines pour la formation de  $\text{NH}^3$  absorbe près de 110 HP par tonne-jour d'ammoniaque-gaz produit.

1000 kg de  $\text{NH}^3$  consomment environ 3000 kg de combustible et l'équivalent de 2500 kWh d'énergie mécanique. Pour une usine comme Oppau (B. A. S. F.) et pour 250 tonnes de  $\text{NH}^3$  par jour, ceci représente 750 tonnes de coke et 625 000 kWh ou leur équivalent en lignite. Seule la vue de pareilles installations permet de se rendre compte du long et patient labeur qu'il a fallu pour les mettre sur pied.

<sup>5)</sup> Environ 400 kg par tonne de  $\text{NH}^3$ -gaz.

<sup>6)</sup> Voir du même auteur l'étude comparative entre le procédé Haber et le procédé Claude (Bulletin technique de la Suisse romande, No. 17 et 18, 1923.).

J'ai indiqué sommairement quelles opérations comportait la préparation des gaz  $N^2 + 3 H^2$  parce que l'électrification possible du procédé en question remplacerait précisément ces opérations et l'appareillage nécessaire à leur exécution.

Le gaz  $N^2$  est produit par des colonnes de distillation Linde ou Claude, suffisamment connues pour que je me dispense d'insister sur leur fonctionnement.

Le gaz  $H^2$  serait demandé à l'électrolyse de l'eau. On peut douter des chances de succès d'une tentative semblable. L'impression première est que la partie électrolyse à elle seule engloutirait un capital-installations hors de proportions avec le but poursuivi: supprimer l'emploi de combustibles importés.

Quoique les chiffres les plus contradictoires aient été donnés au sujet des frais d'installation des usines de  $NH^3$  synthétique (ce qui est du reste le cas pour tous les autres procédés de fixation de l'azote atmosphérique), moyenne faite entre ceux qui méritent le plus de confiance, on arrive à la conclusion pour le moins inattendue que la préparation des gaz par azote-électrolyse entraîne moins de frais de construction que la méthode combustibles-gazogène. Cette différence serait de 9 à 15 %. Quant aux frais d'entretien, de main-d'œuvre, il va de soi que l'avantage est entièrement du côté azote-électrolyse.

L'électrolyse de l'eau ne fournit pas que de l'hydrogène! Elle libère un poids d'oxygène huit fois supérieur. Ce gaz a, lui aussi, absorbé une partie de l'énergie passée dans les cellules; il a une valeur marchande qu'il faudrait récupérer. Or, rien n'est plus difficile que de trouver à placer des quantités aussi énormes d'oxygène. Ce serait attendre du marché une capacité d'absorption qu'il est très loin d'offrir. On ne peut donc compter<sup>1)</sup> que sur une très faible récupération des frais d'électrolyse.

Il est cependant intéressant d'examiner à quel prix on obtiendrait ainsi l'ammoniaque commercial.

### III. Production, consommation d'énergie électrique, prix de revient pour une usine fixant 3500 tonnes d'azote par an.

Le chiffre de 3500 tonnes a été choisi comme égal au tiers environ du complément à fournir sous forme d'engrais à notre agriculture, ainsi qu'on le verra plus loin.

Chiffres de production moyenne pour une usine fixant 3500 tonnes d'azote par an. Tableau I

Procédé	Nitrate de chaux	Acide nitrique	Ammoniaque gaz	solution	Azote	Nitrate de soude 15,5%
<i>1<sup>o</sup> Arc.</i>						
a) {	Production en tonnes	11 000	6 600	—	—	3 500
	kWh/tonne . . . .	11 100	14 300	—	—	65 000
	Tonnes/kW. an . . .	0,787	0,612	—	—	0,135
b) {	Production en tonnes	26 800	—	—	—	3 500
	kWh/tonne . . . .	9 900	—	—	—	65 000
	Tonnes/kW. an . . .	0,875	—	—	—	0,135
c) {	Production en tonnes	—	16 000	—	—	3 500
	kWh/tonne . . . .	—	11 620	—	—	50 000
	Tonnes/kW. an . . .	—	0,750	—	—	0,175
<i>2<sup>o</sup> Cyanamide.</i>						
Production en tonnes .	—	(12 500 <sup>1)</sup>	—	15 600 <sup>1)</sup>	3 500 <sup>1)</sup>	—
kWh/tonne . . . . .	—	(4 810)	21 000	4 500	17 200	—
Tonnes/kW. an . . . .	—	(1,820)	0,416	1,945	0,509	—
<i>3<sup>o</sup> Synthèse de <math>NH^3</math>.</i>						
Production en tonnes .	—	(14 400)	—	18 500	3 500	—
kWh/tonne . . . . .	—	(8 660)	31 500	6 740	26 000	—
Tonnes/kW. an . . . .	—	(1,010)	0,278	1,300	0,337	—

<sup>1)</sup> Compté à partir du carbure.

Le tableau I donne les chiffres de production moyens en tonnes pour les différents procédés et modes d'application qui ont été sommairement décrits sous chiffre 1.

Seul le nitrate de chaux, l'acide nitrique concentré et l'ammoniaque ont été retenus entre tous les produits azotés que nous avons énumérés à la page 558.

On peut, bien entendu, passer facilement à l'un quelconque de ceux-ci par l'ammoniaque et l'acide sulfurique pour le sulfate d'ammoniaque, par l'acide nitrique et l'ammoniaque pour le nitrate d'ammoniaque, transformations d'autant plus couteuses qu'elles exigent l'appoint de matières premières importées.

Au tableau II figurent les éléments de prix de revient en %, avec indication de l'ordre de grandeur de celui-ci pour les différents procédés et leurs applications. Dans ce résumé nous avons admis :

*A* = Intérêts à 5 %; amortissements (3 % sur les bâtiments, 10 % sur les machines et installations); frais généraux et autres frais fixes comptés sur la totalité du capital de premier établissement.

*B* = Main-d'œuvre de fabrication et d'entretien.

*C* = Matières premières, matériel d'entretien; masses de contact pour II et III.

*D* = Energie électrique. (Pour II-Cyanamide, *D* représente le prix de la cyanamide par tonne d'ammoniaque à raison de 1,185 tonnes de  $\text{CaCN}_2$  par tonne de  $\text{NH}_3$  solution.)

Il va sans dire que les résultats ci-dessous ne peuvent pas être considérés comme rigoureusement exacts et définitifs; j'ai signalé au début de cette étude les multiples difficultés que l'on rencontre pour ajuster à nos conditions actuelles, adapter à nos prix du jour pour le bâtiment et la machinerie spéciale un ensemble de données souvent confuses, provenant en majeure partie d'estimations datant de 1914.

Les chiffres obtenus par approximation ne seraient ainsi que la traduction de l'ordre de grandeur attribuable à chaque prix de revient.

On remarquera que le prix du nitrate de chaux à fr. 294.— est trop élevé; à fr. 262.— il se rapproche des prix faits pour le produit norvégien pour février-mars a. c., marchandise f. o. b. Dunkerque.

Tableau II

<i>1<sup>o</sup> Arc.</i>				
<i>a) Nitrate de chaux . . .</i>				
	A %	37,5		
	B %	11,3		
	C %	5,4		
	D %	45,8		
	%	100,0		
<i>Prix de revient<sup>1)</sup> . . . .</i>	fr.	294.—		
<i>Par kg N<sup>2</sup> . . . . .</i>	fr.	2.26		
<i>a<sup>1</sup>) Acide nitrique . . . .</i>				
	A %	35,9		
	B %	9,4		
	C %	11,3		
	D %	43,4		
	%	100,0		
<i>Prix de revient . . . . .</i>	fr.	510.— <sup>2)</sup>		
<i>Par kg N<sup>2</sup> . . . . .</i>	fr.	2.42		
<i>b) Nitrate de chaux . . .</i>				
	A %	32,5		
	B %	7,1		
	C %	11,6		
	D %	48,8		
	%	100,0		
<i>Prix de revient . . . . .</i>	fr.	262.—		
<i>Par kg N<sup>2</sup> . . . . .</i>	fr.	2.01		
<i>c) Acide nitrique . . . . .</i>				
	A %	23,9		
	B %	9,6		
	C %	7,0		
	D %	59,5		
	%	100,0		
<i>Prix de revient . . . . .</i>	fr.	364.—		
<i>Par kg N<sup>2</sup> . . . . .</i>	fr.	1.73		
<i>2<sup>o</sup> Cyanamide.</i>				
<i>Ammoniaque . . . . .</i>				
	A %	19,7		
	B %	9,8		
	C %	3,8		
	D %	66,7 <sup>3)</sup>		
	%	100,0		
<i>Prix de revient . . . . .</i>	fr.	396.—		
<i>Par kg N<sup>2</sup> . . . . .</i>	fr.	2.19		
<i>3<sup>o</sup> Synthèse de NH<sup>3</sup>.</i>				
<i>Ammoniaque . . . . .</i>				
	A %	46,1		
	B %	17,8		
	C %	7,6		
	D %	28,5		
	%	100,0		
<i>Prix de revient . . . . .</i>	fr.	309.—		
<i>Par kg N<sup>2</sup> . . . . .</i>	fr.	1.70		

<sup>1)</sup> Toute la production comptée en nitrate de chaux, déduction faite du nitrate de soude à fr. 210.— % kg.

<sup>2)</sup> Toute la production comptée en acide concentré, déduction faite du nitrate de soude à fr. 210.— % kg.

<sup>3)</sup> Valeur en cyanamide à 18% N<sup>2</sup>.

L'acide nitrique à fr. 510.— est dans la moyenne des prix à l'exportation de 1922 (fr. 521.10). L'avantage du procédé à l'arc avec condensation physique des vapeurs nitreuses est une révélation. Il signale tout l'intérêt qu'il y aurait à suivre le développement de cette méthode, trop récente encore pour que l'on puisse accorder pleine confiance au succès qu'elle semble devoir recueillir.

Quant à l'ammoniaque à fr. 396.—, le prix est sensiblement dans la moyenne pratiquée en 1921. Malgré que la cyanamide ait été comptée très bon marché, il est élevé comparativement au prix que l'Allemagne peut offrir par le procédé Haber au moyen duquel elle fixe annuellement 190 000 tonnes d'azote, soit 48,4 % du total mondial fourni par les différents procédés!

Quels que puissent être les prix de revient, on constate au point de vue *azote et énergie électrique* que celle-ci doit être fournie aux usines de synthèse à des prix très bas que l'on peut estimer à fr. 150.— le kW-an au maximum et que seules certaines installations sont en mesure de supporter.

Pour celles de nos centrales qui ont amorti leurs installations, l'azote pourrait présenter quelque intérêt; mais il suffit qu'elles exécutent de nouveaux aménagements hydro-électriques pour que le prix de revient du kWh soit trop élevé.

Une usine pour 3500 tonnes d'azote par an *ne peut pas travailler avec du courant de déchet*; il lui faut au minimum 30 000 kW constants dans le cas des fours à arc; 10 000 kW dans celui du procédé Haber électrifié. Pareilles quantités d'énergie affectées à une seule exploitation présentent pour les centrales de réels avantages au point de vue de la répartition de la charge et de la constance de celle-ci, mais aussi des risques dont le premier serait la cessation de l'exploitation pour quelque motif que ce soit<sup>7)</sup>.

On s'étonnera du choix qui a été fait d'une production de 3500 tonnes d'azote. Nous allons voir qu'il n'a rien d'exagéré.

Sans vouloir terminer par un cours de chimie agricole, il est indispensable de donner quelques explications au sujet de nos besoins en engrains azotés.

Malgré la grande quantité d'engrais de ferme produite par un effectif de bétail très élevé<sup>8)</sup>, il est nécessaire, chez nous comme par tout ailleurs, de la compléter par des apports de potasse, d'acide phosphorique, de chaux et d'azote.

Nos importations sont loin de satisfaire à ce complément.

Malgré que les engrains nitrés ne soient nécessaires qu'aux plantes sarclées et aux céréales, dans certaines conditions seulement, nous n'avons importé en 1922 que 13 000 tonnes d'engrais azotés, soit environ 1950 tonnes d'azote (moyenne 15% N<sup>2</sup>).

Or, il faudrait pour nos cultures de 50 à 100 kg d'engrais nitrés par hectare, ce qui représente une importation de 85 500 tonnes. Le déficit est donc de 72 500 tonnes d'engrais; en comptant de nouveau 15 % de N<sup>2</sup>, il manque à notre agriculture: 10 850 tonnes d'azote ou près de trois fois la production de l'usine-type de 3500 tonnes choisie comme terme de comparaison dans cette étude. Cette constatation d'un état de choses qui touche de si près à notre économie nationale prête à réflexion. Il ne s'agirait donc pas, pour l'instant, du moins de chercher à placer des produits azotés sur le marché étranger. Notre agriculture est susceptible d'absorber la production de 90 000 kW installés en fours à arc!

Néanmoins, la plus extrême réserve s'impose dès qu'il est question de prévoir la construction d'usines de fixation de l'azote.

D'autres pays se trouvent dans des conditions beaucoup plus avantageuses que nous pour exploiter ces usines. La norvège où les producteurs bénéficient de tarifs d'énergie exceptionnels a eu à lutter contre des difficultés financières sans nombre pour faire vivre son industrie de l'azote. A la veille de la guerre, elle était menacée de devoir fermer ses portes!

<sup>7)</sup> L'expérience faite avec les fours à carbure et à ferro-alliages est suffisante, semble-t-il.

<sup>8)</sup> En azote = 78 200 tonnes par an.

De puissantes usines fonctionnent en Allemagne à des conditions très avantageuses; la France va monter à Toulouse une installation pour 75 000 tonnes par an d'ammoniaque, procédé Haber-Bosch.

Les centres de production de cyanamide, créés pendant la guerre pour la fabrication de l'acide nitrique, peuvent lancer sur le marché près de 900 000 tonnes de cet engrais (Suisse environ 50 000 tonnes).

D'autre part, le sulfate d'ammoniaque à 20 % d'azote est un *sous-produit* des cokerie des hauts fourneaux et des usines à gaz; les fabricants de sulfate d'ammoniaque ont dû assujétir leurs prix à celui des cokeries, car il ne peut être fait de différence entre le produit obtenu par les eaux ammoniacales ou par l'ammoniaque synthétique. Cet engrais est très apprécié et son action fertilisante est des plus complètes. Fabriquer du sulfate d'ammoniaque dans notre pays exigerait d'énormes quantités d'acide sulfurique importé, car nous n'avons aucun intérêt à traiter les pyrites que nous devrions également faire venir de l'étranger.

On pensait avoir raison du salpêtre du Chili (nitrate de soude à 15,5 %) en écartant cette source lointaine d'azote au moyen d'usines de synthèse. Il n'en a rien été. L'agriculteur connaît cet engrais depuis longue date: il n'en avait pas d'autre; et comme les frêts maritimes sont redescendus très rapidement depuis deux ans, notre importation arrive de nouveau au chiffre d'avant guerre. Tout fait prévoir qu'elle ne cessera d'augmenter. La concurrence faite au nitrate naturel par l'industrie de l'azote atmosphérique aura pour conséquence certaine une baisse de prix de la part des exportateurs chiliens; ce que l'industrie n'absorbera plus pour la fabrication de l'acide nitrique sera offert avantageusement à l'agriculture qui ne se fera pas faute de profiter de l'aubaine.

L'industrie de l'azote par l'énergie électrique peut présenter chez nous un certain nombre d'avantages qui engagent à étudier la question dans tous ses détails, mais il faut que, soustraction faite des risques et des difficultés économiques qui sont les nôtres, il reste sous la barre un minimum de sécurité, disons de chances qui motive la création de semblables entreprises et permette à nos centrales de vendre leur courant à des conditions acceptables, ceci d'autant plus que les nouvelles installations hydro-électriques sont plus couteuses.

## Zusätzliche Verluste in Synchronmaschinen und ihre Messung.

Von Reinhold Rüdenberg, Charlottenburg.

(Fortsetzung und Schluss.)

*Nachdem der Autor im ersten Teile dieser Arbeit<sup>1</sup>) die in Synchronmaschinen auftretenden Streufelder untersucht und Formeln zu deren Berechnung angegeben hat, gibt er im vorliegenden Teil die Ergebnisse zahlreicher Versuche an aus Maschinen, durch welche der Sitz der Zusatzverluste festgestellt und in Uebereinstimmung mit den Berechnungen gefunden wird. Gleichzeitig weist er nach, dass die Zusatzverluste mit grosser Genauigkeit durch einen Kurzschlussversuch an der fertigen Maschine festgestellt werden können.*

<sup>1)</sup> Siehe Bulletin 1923, No. 9, Seite 514 und ff.

*Après avoir indiqué, dans la première partie de son article<sup>1)</sup>, comment il est possible de déterminer les pertes dues aux flux de dispersion l'auteur rend maintenant compte du résultat de nombreuses expériences exécutées sur différentes machines dans le but de déterminer le siège des différentes pertes.*

*Il démontre la concordance entre ses formules et les expériences et la possibilité de déterminer les pertes expérimentalement avec une grande précision au moyen d'un essai en court-circuit.*

<sup>1)</sup> Voir Bulletin 1923, No. 9, page 514 et suivantes.

### 2. Messung der Zusatzverluste.

Man kann die Zusatzverluste von Synchronmaschinen durch relativ einfache Messungen weitgehend *in ihre verschiedenen Bestandteile zerlegen*. Zur Kontrolle der Richtigkeit der Ständerwicklung und auch zur Kontrolle der Streuspannung der Maschine, deren Wert für die Grösse des Stosskurzschlusstromes ausschlaggebende Bedeutung hat, pflegt man im Prüffelde häufig eine „*Streuprobe*“ bei herausgenommenem Läufer nach Fig. 15 vorzunehmen, indem man die Ständerwicklung mit