

1/6

LA CRISE
DU
COMBUSTIBLE
ET SES REMÈDES

PAR

AIMÉ WITZ

Ingénieur des Arts et Manufactures,
Doyen honoraire de la Faculté libre des Sciences de Lille,
Correspondant de l'Institut.

PARIS
LIBRAIRIE OCTAVE DOIN
GASTON DOIN, ÉDITEUR
8, PLACE DE L'ODÉON, 8

1920

Tous droits réservés

LA FRANCE
HOMBERGSTEIN
ET SES REACTIONS

1900

LA FRANCE
HOMBERGSTEIN
ET SES REACTIONS

16 MARS 1949
1716
VILLE de LILLE

N° 403650/- 19/98

LA CRISE
DU
COMBUSTIBLE
ET SES REMÈDES

N 013 9050507-131906

LA CRISE
DU
COMBUSTIBLE
ET SES REMÈDES

PAR

AIMÉ WITZ

Ingénieur des Arts et Manufactures,
Doyen honoraire de la Faculté libre des Sciences de Lille,
Correspondant de l'Institut.

PARIS
LIBRAIRIE OCTAVE DOIN
GASTON DOIN, ÉDITEUR
8, PLACE DE L'ODÉON, 8

1920

Tous droits réservés

INTRODUCTION

The first part of the book is devoted to a general introduction to the subject of the book. It discusses the importance of the subject and the scope of the book. It also discusses the organization of the book and the notation used throughout.

The second part of the book is devoted to the study of the properties of the function $f(x)$. It discusses the basic properties of the function and the methods for its calculation. It also discusses the asymptotic behavior of the function and the methods for its approximation.

The third part of the book is devoted to the study of the properties of the function $g(x)$. It discusses the basic properties of the function and the methods for its calculation. It also discusses the asymptotic behavior of the function and the methods for its approximation.

The fourth part of the book is devoted to the study of the properties of the function $h(x)$. It discusses the basic properties of the function and the methods for its calculation. It also discusses the asymptotic behavior of the function and the methods for its approximation.

The fifth part of the book is devoted to the study of the properties of the function $k(x)$. It discusses the basic properties of the function and the methods for its calculation. It also discusses the asymptotic behavior of the function and the methods for its approximation.

INTRODUCTION

La crise aiguë du combustible que nous traversons est due principalement à une pénurie, causée par une extraction insuffisante; mais elle est aggravée par la difficulté des transports, par une répartition défectueuse de nos disponibilités et par une utilisation souvent irrationnelle de nos ressources.

La crise est générale; l'Angleterre, qui exportait avant la guerre 77 millions de tonnes de charbon, sur les 230 millions qu'elle produisait, se suffit à peine à elle-même aujourd'hui; les charbonnages allemands ne fournissaient, en novembre 1919, que les 62 centièmes de ce qu'ils avaient tiré du sol au mois correspondant de 1913; les Etats-Unis d'Amérique ont augmenté leur production et l'ont portée de 517 à 625 millions de tonnes, mais on a calculé que, pour combler le déficit européen, ils devraient nous apporter annuellement 80 millions de tonnes, soit le quadruple de leur exportation normale, et l'on ne pense pas qu'ils puissent le faire, alors même que leur flotte disposerait du tonnage nécessaire. La vaillante Belgique, qui a retrouvé à

*

peu près les chiffres de son extraction passée, sera sans doute la plus empressée à soulager notre misère : toutefois elle ne pourra guère exporter que le tiers de ce qu'elle passait à ses voisins avant la guerre.

C'est la France qui souffre le plus du manque de houille. Elle se trouvait déjà dans une situation précaire avant la guerre, attendu qu'elle ne produisait par an que 40.130.000 tonnes, tandis qu'elle en consommait 64.830.000; les 793.000 t. de lignite et les 60.000 tonnes de tourbe, qu'elle extrayait d'autre part¹, constituaient un très maigre appoint au combustible dont elle disposait. Aujourd'hui la disette est bien plus grande dans notre malheureux pays; les charbonnages du Nord et du Pas-de-Calais, systématiquement et odieusement dévastés par l'ennemi, ont réduit considérablement leur extraction, qui dépassait autrefois 28 millions de tonnes, soit par mois 2.333.000 tonnes; celle-ci est tombée au tiers environ, attendu qu'en novembre 1919 elle n'était que de 90.000 tonnes dans le Nord, et de 689.000 tonnes dans le Pas-de-Calais. Les prévisions pour l'année 1920 sont de 30.000 tonnes par jour ouvrable : puissent-elles se réaliser. Nos autres régions charbonnières restées indemnes sont elles-mêmes en déficit, par inertie

1. Ce sont les chiffres admis par M. Métivier dans le Rapport qu'il a présenté, le 27 juin 1919, au Comité général du Pétrole; ce rapport a été analysé dans le numéro du 4 octobre 1919 du *Génie Civil*.

peut-être, mais plus encore par le désastreux effet d'une loi imprudente, réduisant à 6 heures et demie la durée effective de la journée de travail du mineur, et de grèves coupables, qui ne sont pas toujours provoquées par les légitimes revendications fondées sur la cherté de la vie. La réannexion de l'Alsace-Lorraine et la reprise de ses mines et de celles de la Sarre, loin de corriger la situation, n'ont fait que l'empirer, puisque les 16 millions de tonnes annuelles de ce bassin ne suffisent pas à ses besoins en houille crue et surtout en coke. Somme faite de toutes nos ressources, la production de nos houillères françaises a été de 28.929.000 tonnes en 1917, 26.322.000 tonnes en 1918 et 19.500.000 en 1919; elle était donc progressivement décroissante.

L'Allemagne devait livrer de ses charbons à l'Entente à partir de septembre 1919, et il revenait à notre pays de ce tribut annuel 27 millions de tonnes; elle s'est exécutée en partie, mais elle ne manquera pas de prétextes pour tenter de se soustraire à ses engagements, en ceci comme dans le reste, si l'on continue à raisonner et à discuter avec ses représentants techniques. Bref, notre détresse est extrême, et l'on pourrait parler de la grande pitié de l'industrie de France, privée du charbon, qui est son pain quotidien. On devrait clamer cette pitié sur les chemins parcourus par nos mineurs et dans les corons qu'ils habitent, en leur rappelant que le pays attend d'eux l'effort libérateur qui le sauvera.

Ces hommes ont montré, sur les champs de bataille et dans les tranchées, qu'ils ne le cèdent à aucun autre en bravoure et en patriotisme ; et puis, ils ont l'amour-propre de leur métier : il faut leur dire que le rendement de leur journée de travail, qui était autrefois de 975 kilos par jour, est tombé à 770, et qu'il est inférieur au rendement américain, anglais et belge. Ils ne voudront pas être inférieurs aux autres, et ils se ressaisiront.

En attendant, voici quelles sont nos ressources, telles que les a présentées à la Chambre le ministre des Travaux Publics. Il nous faut, paraît-il, 70 millions de tonnes ; les mines françaises indemnes en produiront 20, les mines du Nord et du Pas-de-Calais extrairont ce qu'elles pourront, mais l'Allemagne complétera ce tonnage à 27 millions ; les mines anglaises en livreront 18 et les belges le reste. Nous importerions donc près de la moitié de notre consommation. Il nous faut au moins cette quantité, car nous avons à remplacer de plus en plus dans nos usines le travail humain par celui des machines ; en Amérique, la puissance des mécaniques, par paire de bras d'ouvrier, était au début du siècle double de ce qu'elle était en Angleterre, et presque triple de ce qu'elle était chez nous ; nous étions donc bien en retard déjà sur nos concurrents industriels ; et nous le serons davantage à la suite de cette lutte sauvage, qui nous a coûté un million et demi d'hommes.

Trouverons-nous à acheter à l'étranger ce qui nous manque ? Oui, sans doute ; mais ce sera au poids de l'or. Le prix de 25 francs la tonne, moyennement pratiqué en France avant la guerre, était taxé officiellement à 46 fr. 80 en 1916, pour le charbon national, et à 77 fr. 60 pour le charbon importé d'Angleterre ; sur la fin de 1917, la cote était de 110 fr. 35 pour Paris et sa banlieue. En 1919, l'Office départemental de l'Est fixait à 150 francs le prix de la houille, et à 205 francs celui de l'anhracite ; le 1^{er} janvier 1920, ces prix étaient portés à 195 et à 260 francs, plus 15 francs pour la surtaxe spéciale dite de péréquation. Le 11 janvier, un ministre conseillait aux industriels lillois d'acheter du charbon américain, qui « rendu vous coûtera 300 francs la tonne », disait-il. Et les prix continuent de monter, au fur et à mesure que la valeur du franc de France baisse en fonction de la Livre et du Dollar. Récemment on offrait des charbons américains à 31 Dollars, soit à plus de 465 francs. On frémit en supputant la sortie de numéraire qu'entraîneront ces achats au dehors, et en envisageant la détérioration permanente du change qui en résultera.

Nous ne nous tirerons de cette situation dangereuse et angoissante qu'en diminuant à l'extrême notre consommation de combustible : il faudra se restreindre en tout, en supprimant non pas seulement le moindre gaspillage, mais encore les plus modestes emplois de luxe, et en

réalisant des économies dans tous les domaines. Restriction et économie stricte, poussée jusqu'à l'avarice la plus sordide ; tel est le cri général, jeté par les économistes et par les techniciens ; tous sont d'accord sur ce point.

L'accord est moins complet, lorsqu'on passe à l'examen des voies et moyens qui conduiront au résultat.

Jamais problème plus difficile n'a été posé aux ingénieurs. L'objet de cette étude est de discuter les solutions qui ont été suggérées et les méthodes qu'on a préconisées. Il en est d'excellentes, dont on peut escompter les heureux effets, et qu'on peut appliquer tout de suite : qu'on les mette en œuvre d'urgence. Plusieurs d'entre elles ne sont pas nouvelles, mais la mise au point, qui en est faite, leur confère une réelle supériorité sur des inventions plus récentes et plus originales, qui n'ont pas encore reçu le baptême de l'épreuve. Quelques-unes de ces dernières exercent sur les esprits, par leur élégance, une séduction qui fait oublier qu'elles exigeront de longs et laborieux tâtonnements ; d'autres sont encore dans le domaine des rêves. Méfions-nous des unes et des autres, et ne déprécions pas ce qui a été fait dans le passé : il y a longtemps qu'on avait le souci de l'économie du combustible et qu'on la pratiquait non sans succès. N'acceptons pas sans les discuter les solutions trop générales : il n'existe pas de panacées universelles. Gardons-nous aussi d'accorder à

l'intervention du Dieu-Etat une puissance qu'il ne possède pas; il paralyserait l'action de l'intérêt privé, s'il se substituait à lui, au lieu de se borner à l'aider.

Nous commencerons par nous rendre compte de l'usage qui est fait actuellement de notre combustible, afin de savoir quelles sont les branches dans lesquelles il importe le plus de réduire sa dépense, et quelle est la manière générale d'obtenir ce résultat le plus rapidement et le mieux possible, en utilisant les moyens dont nous disposons *hic* et *nunc*. Nous chercherons ensuite dans quelle mesure on peut suppléer au manque de houille par l'emploi de matières insuffisamment utilisées jusqu'ici, de succédanés et d'adjuvants. Nous pourrons alors entrer plus profondément dans le vif de la question, en cherchant comment on arrivera à améliorer, en recourant à des procédés spéciaux et à des inventions nouvelles, le rendement des combustibles en calories et le rendement de ces calories en kilogrammètres.

Le sujet que nous nous proposons de traiter est extrêmement vaste et particulièrement délicat; nous nous efforcerons de présenter d'abord des vues d'ensemble, avant d'analyser et de fouiller les méthodes à employer pour permettre à l'industrie française de lutter contre la concurrence de voisins, auxquels la Providence a plus largement départi ces réserves naturelles d'énergie, dont l'humanité disposera durant quelques siècles encore.

ÉCONOMIES ET RESTRICTIONS

Le charbon reçoit dans l'industrie et dans la vie domestique les applications les plus diverses, qu'il est difficile de spécifier par le détail, en les classant d'après leur importance relative ; toutefois on peut attribuer d'une manière approximative les usages qui en sont faits, chez nous et à l'étranger, de la manière qui suit ¹ :

	France	Angleterre	Allemagne	Etats-Unis d'Amérique
	1913	1907	1913	1915
Puissance motrice... {	28,5 0/0	14,4 0/0	14,1 0/0	33,0 0/0
Stations d'électricité. {			12,9	
Chemins de fer.....	16,6	4,7	9,3	24,0
Navigation.....	2,0	7,7	5,3	2,1
Usines à gaz.....	7,2	5,7	5,3	0,9
Fours à coke.....	19,4	7,7	23,4	11,6
Métallurgie.....		5,8		
Mines.....	7,8	6,1	4,0	1,9
Agriculture.....	—	3,0	3,5	—
Céramique, etc.....	—			
Chauffage domestique	18,5	20,1	9,1	22,0
Exportation.....	0	24,8	13,1	4,5
	100,0	100,0	100,0	100,0

1. Ce tableau a été dressé d'après les indications du Rapport de M. Métivier, déjà cité, et de celui de M. Pinot, secré-

ÉCONOMIES ET RESTRICTIONS

Le charbon reçoit dans l'industrie et dans la vie domestique les applications les plus diverses, qu'il est difficile de spécifier par le détail, en les classant d'après leur importance relative ; toutefois on peut attribuer d'une manière approximative les usages qui en sont faits, chez nous et à l'étranger, de la manière qui suit ¹ :

	France	Angleterre	Allemagne	Etats-Unis d'Amérique
	1913	1907	1913	1915
Puissance motrice... Stations d'électricité... Chemins de fer..... Navigation..... Usines à gaz..... Fours à coke..... Métallurgie..... Mines..... Agriculture..... Céramique, etc..... Chauffage domestique Exportation.....	28,5 0/0 — 16,6 2,0 7,2 19,4 7,8 — — 18,5 0	14,4 0/0 — 4,7 7,7 5,7 7,7 5,8 6,1 3,0 20,1 24,8	14,1 0/0 — 12,9 9,3 5,3 23,4 4,0 3,5 9,1 13,1	33,0 0/0 — 24,0 2,1 0,9 11,6 1,9 — 22,0 4,5
	100,0	100,0	100,0	100,0

1. Ce tableau a été dressé d'après les indications du Rapport de M. Métivier, déjà cité, et de celui de M. Pinot, secré-

Voici d'autre part comment M. Métivier répartit les puissances motrices de l'industrie fixe française, marine et chemins de fer non compris :

Stations d'électricité	22,1 %
Métallurgie	17,0
Mines et carrières	16,2
Industrie textile	15,3
Industrie chimique	4,0
Agriculture et produits alimentaires	12,1
Industries diverses	13,3
	<hr/> 100,0

La puissance totale des machines motrices, auxquelles se rapporte cette évaluation, s'élève à 3.539.086 chevaux pour 81.740 unités, sur lesquelles il y a 34.115 locomobiles d'une puissance moyenne de 8,6 chevaux : il s'agit probablement ici de chevaux indiqués, mais M. Métivier ne précise pas ce point, qui ne manque néanmoins pas d'importance. La moyenne des machines productrices d'électricité est de 974 chevaux, par établissement; elle n'est que de 90 chevaux pour l'industrie textile. On est porté à croire que les quatre premières branches de l'industrie consomment environ 13 millions de tonnes, ce qui fait ressortir le cheval-an à 5.250 kilogs, et le cheval-heure à 2 kilogs, en comptant sur 2.600 h. de travail par an à pleine

taire du Comité des Forges de France; pour l'étranger, les chiffres produits sont empruntés au livre de M. W. BONE : *Coal and its scientific uses*, pages 197,477 et suivantes (Longmans, Green and C^o, London, 1918).

charge. Pour les trois autres branches, qui comprennent les locomobiles, la consommation horaire par unité de puissance est pour le moins double. Mais ce ne sont là que de premières approximations sur lesquelles nous reviendrons plus loin.

La métallurgie de gros œuvre est un des plus gros consommateurs ; elle figurait dans le bilan charbonnier de la France pour 12.500.000 tonnes, en 1913 ; de fait, nous avons produit, en cette année, 5.207.000 tonnes de fonte et 5.093.000 tonnes d'acier. Les établissements d'Alsace-Lorraine augmenteront plus tard cette production et nous mettront en tête de la sidérurgie européenne, mais nous ne saurions dire avec quelque précision quelle sera l'importance de nos fabrications, en 1920, car les Allemands ont détruit 14 de nos plus grandes usines, et leur reconstitution progresse fort lentement. Il est certain que de ce côté la demande de coke sera considérable et qu'il nous sera impossible d'y satisfaire. En ce moment, en Angleterre, deux hauts fourneaux seulement sont en marche sur trois, par manque de combustible, et l'on chôme deux jours par semaine en beaucoup de laminoirs : on peut juger d'après cela de la situation qui sera faite à nos maîtres de forges.

La consommation domestique est d'environ 12 à 14 millions de tonnes. L'éclairage ne figure qu'implicitement dans nos relevés, par les usines à gaz et les centrales d'électricité.

Ce sont donc les machines motrices de toute espèce, la métallurgie, le chauffage et l'éclairage qui mettent le plus fortement à contribution nos ressources combustibles : c'est sur ces points que toute restriction et la moindre économie seront les plus opérantes et les plus immédiatement réalisables. Qu'est-il possible de faire ?

Se restreindre n'est guère possible, il est vrai, sur les postes qui intéressent la vie industrielle du pays : il ne faut point oublier que la puissance unité du cheval, du *horse power*, équivaut à celle de 21 hommes, et qu'on peut la faire travailler 24 heures, c'est-à-dire 3 fois 8 heures. Les Américains et les Anglais paraissent le savoir mieux que nous, je l'ai déjà signalé ; or, nous avons autant et plus qu'eux à produire pour les besoins du pays et l'exportation. Supprimer des trains sur les chemins de fer, c'est augmenter la crise des transports, dont nous souffrons déjà tant. En sidérurgie, ce serait une dérision que de parler de restriction : on ne prêche pas abstinence à un trappiste.

La consommation domestique peut être réduite par une privation plus ou moins résignée des habitants, mais est-il une mesure plus restrictive que ne l'est la carte de charbon ? Je ne ferai pas à ceux qui nous administrent l'injure de croire qu'il soit fait des exceptions en faveur de foyers privilégiés. Il y aurait assurément un gain à réaliser sur l'éclairage de plusieurs boulevards trop étincelants de lumière, et surtout des établisse-

ments de nuit et des lieux de plaisir, music-halls et innombrables cinémas : n'oublions pas que toute économie réalisée sur eux permettrait d'accorder quelques sacs de charbon de plus aux ménages où des enfants et des vieillards grelottent. Le décalage de l'heure, imposé hâtivement cette année avant l'équinoxe, nous vaudra quelques centaines de mille tonnes sans nous imposer aucun sacrifice : c'est un artifice des plus louables, auquel la France a recouru des premières. En somme, on n'a pas le droit de nous accuser de gaspillage.

Est-ce à dire que nous sommes assez économes ? Les pauvres ne le sont jamais trop. Or, il semble que nous dépensions à l'ordinaire pour nous éclairer plus de calories, donc de combustible, qu'il ne faudrait. Nous ne faisons peut-être pas un emploi assez judicieux des remarquables sources de lumière dont nous disposons aujourd'hui.

Le tableau ci-dessous paraît en témoigner. Il met en parallèle le nombre de calories qui correspond à la bougie-heure, fournie par les foyers de lumière les plus modernes :

GAZ		ÉLECTRICITÉ	
Bec Auer droit.....	16 cal.	Incandescence, filament de charbon.....	32 cal.
— — renversé..	12	Incandescence, filament métallique..	13,75
Lampe à gaz surpressé.....	5,75	Lampe 1/2 watt (atmosphère d'azote)	7,75
		Arc flamme	3,75

L'arc flamme d'une puissance de mille bougies, auquel se réfère cette dernière consommation si réduite, ne convient, il est vrai, qu'aux vastes espaces ; disons aussi que la lampe demi-watt ne descend guère au-dessous de 50 bougies. Quoi qu'il en soit, nous constatons qu'il y a des calories, donc du combustible à regagner dans l'éclairage par le choix des sources.

Il y en a bien plus à gagner dans le chauffage de nos maisons. De tous les appareils dans lesquels on brûle du charbon pour engendrer des calories, le plus imparfait est sans contestation possible le feu ouvert, dont la flamme claire réjouit nos yeux, mais qui jette à la cheminée, sans autre profit que de produire une ventilation de nos pièces, de 90 à 95 % du calorique développé, et le poêle, qu'on loue parce qu'il n'en dilapide que 80 à 85 %. De ce côté, on trouverait beaucoup à faire, si on le voulait. Les foyers américains et les salamandres seraient à recommander vivement, s'ils étaient toujours installés comme ils doivent l'être en respectant les lois de l'hygiène : il est vrai qu'ils exigent de bon anthracite, pour fonctionner convenablement. Le chauffage central par immeuble s'accommode de tout combustible, et conduit à une économie réelle, car il possède un rendement d'au moins 60 %. En Amérique, on a centralisé davantage, en créant des usines de chauffage, qui canalisent et vendent des calories. En attendant que nous en arrivions là, nous avons des marchands de

courant électrique dont la marchandise est coûteuse, mais qu'on peut néanmoins utiliser avec avantage, dans un cabinet de toilette, une salle à manger, chauffée seulement à l'heure des repas, un boudoir ou un petit salon, au moment d'une visite courte ou imprévue, en un mot pour des services intermittents ou momentanés. L'électricité reste chère malheureusement ; et un kilowatt-heure ne fournit que 860 calories : c'est peu, pour ce que cela coûte ! Par contre, on fera observer que certains radiateurs utilisent les 90 ou 95 centièmes de l'énergie reçue. D'autre part, nous rappellerons aux Centrales d'électricité que leur courant pourrait être vendu à prix réduit, aux heures mortes, pour améliorer leur facteur de puissance ; les heures mortes sont de midi à 13 heures, de 23 heures à 6 heures du matin. Le client installerait des appareils à accumulation ou récupération : tels sont certains radiateurs, utilisant l'eau comme volant de chaleur ; une résistance, en alliage chrome-nickel, enroulée sur cylindres isolants, enrobée dans un silicate, est renfermée dans des tubes à hydrogène raréfié, évitant l'oxydation du métal, et le tout est plongé dans une chambre d'eau. Disons, pour terminer, que l'électricité a déjà trouvé d'heureux emplois dans les cuisines anglaises : au restaurant Romano de Londres, on dépense 34 kilowatts-heure par jour pour toutes les opérations culinaires, et les cordons bleus de la maison s'en trouvent aussi bien que le gérant de

l'établissement. On a calculé que si la moitié des opérations de cuisine et de chauffage étaient effectuées par l'intermédiaire du courant, sur toute l'étendue du Royaume-Uni, on arriverait bon an mal an à économiser 10 millions de tonnes de houille de bonne qualité. Enregistrons l'affirmation, sous bénéfice d'inventaire.

Le chauffage par le gaz de ville, plus ou moins additionné de gaz à l'eau, est aussi de nature à produire une économie de combustible : à Berlin, le mètre cube à 13,75 centimes avait été mis de pair avec le kilowatt-heure à 5 centimes. En Angleterre, 55 % du gaz des usines vont au chauffage, 35 à l'éclairage et 10 aux moteurs : nous avons moins de moteurs que nos alliés.

Nous brûlions en France, en 1913, environ 20 millions de tonnes de charbon pour engendrer de la puissance motrice, en dehors des chemins de fer et de la marine ; une économie de 10 % nous ferait donc gagner 2 millions de tonnes. Cela vaut la peine d'y regarder de près.

La puissance motrice, développée par des moyens thermiques, peut l'être plus ou moins économiquement, c'est évident : il y a donc de ce chef un bénéfice certain à réaliser en maintes installations, et ce bénéfice peut être réalisé immédiatement. Il est vrai que, malgré l'intérêt qu'ils y trouveraient, beaucoup d'industriels, et non des moindres, ignorent le plus souvent le prix auquel leur revient l'énergie qu'ils produisent dans leurs établissements : les hauts prix

des houilles les corrigeront de cette insouciance. Nous savons depuis longtemps que les Anglais, qui payaient la tonne 10 shillings (12 fr. 60)¹, se contentaient de machines à vapeur médiocres, consommant souvent 2 k. 250 par cheval-heure indiqué, tandis que les Suisses, qui achetaient aux Allemands leur combustible très cher, montaient des machines remarquablement économiques : prenons exemple des Suisses, et ne soyons pas moins avisés que nos bons voisins de Berne et de Zurich. Sacrifions résolument des installations défectueuses ou surannées, réparons et corrigeons celles qui peuvent l'être, quoi qu'il nous en coûte, mais surtout tirons le meilleur parti possible des appareils que nous possédons.

Pour cela, il faut l'œil du maître auquel rien n'échappe, qui contrôle le moindre détail, voit tout lui-même et supprime tout coulage. Par des essais et des observations judicieusement ordonnés et patiemment poursuivis, le chef d'industrie se rendra compte de la qualité des houilles employées, des quantités brûlées, de la manière dont elles sont brûlées, des poids d'eau vaporisée, de la puissance développée, de la constance de la pression aux générateurs et de la vitesse aux moteurs. Il viendra l'une ou l'autre fois surveiller un décrassage des feux, et ne rougira pas de faire trier les scories, dans lesquelles on récupère

1. Ce prix avait augmenté de 38 %, depuis l'année 1900.

parfois 10 % d'escarbilles parfaitement combustibles. Cela peut s'effectuer dans les usines petites et grandes. Dans celles-ci, on organisera un service général d'économie de combustible disposant d'un matériel complet d'études, pyromètres, calorimètres, manomètres, enregistreurs de pression, de vitesse, de composition des fumées, compteur d'eau ou de vapeur, etc. Ce service fonctionne, sous la direction de M. Laurent, à la Compagnie des Forges et Aciéries de la Marine et d'Homécourt¹. Les résultats sont extraordinaires : M. Damour a déclaré, en 1914, dans une conférence donnée à la Société d'Encouragement, que ces méthodes permettent d'obtenir une économie de 15 à 20 % et son dire n'a trouvé aucun contradicteur ; souhaitons que ces procédés trouvent de nombreux imitateurs.

M. Charpy a procédé par une méthode différente à l'usine Saint-Jacques de Montluçon, avec non moins de succès. Le savant membre de l'Institut est parti du principe qu'il faut supprimer autant que possible la main-d'œuvre ouvrière en installant partout des appareils dont le fonctionnement fût presque automatique, et permit à des hommes non spécialisés de suivre des règles simples, sûres et précises, qui leur seraient constamment rappelées de diverses façons. On simplifiera donc à l'extrême le rôle d'un personnel

1. Voir le remarquable Mémoire de M. Laurent dans la *Revue de Métallurgie*, numéro de mars et avril 1918.

subalterne, de façon à pouvoir le dresser effectivement à un travail rigoureusement défini par des ordres préalables faciles à exécuter et à contrôler¹.

Il y a en général plus à gagner sur les chaudières qui produisent la vapeur que sur les machines qui actualisent son énergie. Deux facteurs sont prépondérants dans la conduite d'un foyer : le combustible et le chauffeur. On ne peut dire que chaque appareil exige son combustible ; et pourtant, l'état physique de la houille et sa composition chimique, en particulier sa teneur en matières volatiles et en cendres, et la plus ou moins grande fusibilité de celles-ci, ont une influence sur le rendement, qui varie avec la forme du foyer, avec celle de la grille et l'intensité du tirage dont on dispose. Mais je ne peux entrer en ce moment dans le détail de cette discussion, et me contenterai de faire remarquer que d'une part un charbon à plus de 30 % de matières volatiles et renfermant près de 20 % de cendres à point de fusion relativement bas, et que d'autre part des fines trop maigres, qui ne s'agglutinent pas, sont d'un emploi fort ingrat². Toutefois n'insistons pas sur ces points :

1. M. Charpy a fait, le 8 mars 1919, à la Société d'Encouragement une conférence sur les « Essais d'organisation méthodique dans une usine métallurgique », dans laquelle il a exposé ses idées.

2. Le meilleur combustible pour chaudière est le demi-gras ; quand on n'en reçoit pas de la mine, on peut faire des mélanges qui se rapprochent de cette qualité type, à 16 %.

aujourd'hui on brûle le charbon qu'on trouve, sauf à l'employer le mieux possible.

Cet emploi dépend du chauffeur, dont le rôle ne saurait être trop apprécié; on l'a appelé, non sans humour, le chevalier de la pelle et du registre, et ce n'est pas mal dit, car ces braves serviteurs du foyer développent souvent une activité et un dévouement qu'on ne saurait trop louer. Leur influence sur l'économie du combustible est énorme, ainsi que nous le démontrerons plus loin.

Les considérations succinctes qui précèdent suffisent pour établir ce que je voulais démontrer, à savoir qu'il y a un art d'employer le combustible dont on dispose, et qu'on peut réaliser ainsi, sans délai, et sans qu'il soit besoin de bouleverser toutes les méthodes et toutes les traditions, d'importantes économies : elles sont beaucoup moindres pour la machine thermique, qui transforme les calories en kilogrammètres. D'une machine à vapeur à l'autre de même puissance on gagne difficilement 10 %; d'autre part, si un moteur à gaz pauvre permet d'économiser beaucoup mieux les calories, il lui faut un charbon de choix, pas trop riche en matières volatiles,

environ de matières volatiles. Les résultats obtenus ainsi sont quelquefois surprenants; les maîtres de l'école de Mulhouse ont démontré qu'un mélange judicieux de deux houilles peut donner un rendement supérieur de 10 % à la moyenne des composants; tel est le cas d'un mélange de 1/3 de Ronchamp et de 2/3 de Creusot. J'ai fait ailleurs des constatations analogues.

ne renfermant pas trop de cendres, ne contenant pas de poussier, qu'on ne se procure pas aisément dans les conditions voulues dans notre extrême pénurie actuelle¹. D'ailleurs, le moteur à gaz perd une partie de ses avantages économiques dans les industries qui ont besoin de vapeur : il est rare que la récupération de la chaleur des gaz de l'échappement du moteur dispense alors d'installer à côté de lui une chaudière, et le gain de charbon que l'on avait escompté s'évanouit souvent; dès lors, la machine à vapeur reprend la supériorité. Sa décharge est utilisable pour des chauffages variés dans des aéro-condenseurs pour sécheries, ou encore dans des réchauffeurs d'eau en teinturerie et en brasserie. En ces dernières années, ces applications se sont répandues et vulgarisées, et l'on a vu par exemple des établissements de bains publics installer des générateurs à haute pression, dont la vapeur se détendait d'abord dans un groupe électrogène avant d'aller chauffer l'eau des baignoires, de telle sorte que l'établissement était éclairé et actionné gratuitement, si même il ne vendait pas d'énergie électrique au dehors. Les machines et turbines à contre-pression et dérivation de vapeur forment une autre catégorie de moteurs à utilisation double de l'énergie

1. Je me permets de renvoyer à une conférence que j'ai donnée à la Société Industrielle de Lille en 1913, sur la *crise de la machine à vapeur*, dans laquelle j'ai développé le parallèle entre les meilleures machines thermiques.

calorifique, sur lesquels nous aurons à revenir, mais que nous devons mentionner dans ce premier aperçu général.

En métallurgie et sidérurgie, nos ingénieurs étaient près de regagner, en 1914, l'avance qu'avaient prise sur eux leurs collègues de Belgique, d'Angleterre, d'Amérique et d'Allemagne, et nos installations rivalisaient avec les leurs : pour la fonte de fer, 1 tonne pour 1 de coke, un peu moins pour les produits finis d'acier, 5 pour 1 pour le zinc, tels étaient les chiffres admis généralement, qui laissaient peu de marge aux améliorations courantes. Toutefois, dans son étude déjà citée, M. Laurent signalait que, à Homécourt, un bénéfice « de 10 kgr. sur la mise au mille concomitante à une disposition de gaz de haut fourneau représentait 25 kgr. par tonne de fonte, soit une économie de 35 kgr. »; sur un four Martin, on avait conquis 100 kgr. par tonne d'acier, grâce à une habile organisation de surveillance et d'inspection. L'utilisation directe des gaz de hauts fourneaux par moteurs s'impose partout; autrefois on brûlait 1.400 litres de ces gaz pour produire 1 kgr. de vapeur par les chaudières; ce volume donne un demi-cheval-heure effectif aux moteurs, ce qui correspond à un rendement cinq fois plus élevé et n'exige qu'un complément d'épuration. De nombreux établissements ne consomment presque plus de houille crue¹.

1. Cf. Wirz: *Dernière évolution du moteur à gaz*; page 98. Paris, Geisler, 1910.

Sur ce terrain, plus rien à innover, car les résultats sont acquis : il n'y a qu'à suivre le mouvement. Nos métallurgistes le feront.

Nos fours à coke à récupération sont eux aussi au point : on n'aura qu'à les développer et à veiller à l'emploi de leurs nombreux et précieux sous-produits. Le 11 juin 1917, M. Charpy annonçait à l'Académie des Sciences qu'un traitement thermique convenable permettait d'obtenir de bon coke métallurgique avec des houilles qu'on croyait jusque-là inutilisables à cet effet ; d'autre part, les usines à gaz ont trouvé le moyen, en élevant la température de leurs cornues, de fournir un coke plus dense, et un goudron plus fluide, sans exagérer néanmoins les décompositions pyrogénées du gaz ; ce coke trouvera son emploi en métallurgie, et maintenant qu'il existe des hauts fourneaux non seulement dans l'Est, dans le Nord, dans la Loire et dans les Pyrénées, mais encore dans la Normandie, la Loire-Inférieure et ailleurs, les usines trouveront des débouchés faciles pour ce coke, dont la vente sera moins paralysée par les difficultés de son transport.

La revue rapide que nous venons de faire est assurément incomplète ; mais elle suffit pour démontrer que la technique de l'utilisation des combustibles est déjà très avancée : nous pouvons, dès maintenant et avec les moyens dont nous disposons, réaliser de copieuses économies de combustible.

Il n'y a qu'à développer des méthodes connues et à les appliquer avec intelligence. Qu'on se mette donc à l'œuvre ; il y a urgence !

*
**

On dira qu'il y a mieux à faire.

Ce sera l'œuvre de demain, sinon de plus tard : mais le proverbe prétend qu'il vaut mieux tard que jamais, et il faut en croire le proverbe.

L'intérêt national est tellement engagé dans l'économie du charbon, chaque tonne de ce précieux produit brûlée en moins augmente tellement l'actif du pays, qu'il ne faut reculer devant aucun moyen pour obtenir ce résultat : or, l'intérêt privé ne suffirait pas pour cela, dit-on. La plus ou moins parfaite utilisation du combustible ne doit plus dépendre uniquement de la bonne volonté ou du savoir-faire de chacun. Il faut des méthodes nouvelles et des procédés meilleurs : de plus, une coordination d'ensemble des efforts s'impose absolument.

Commençons, en effet, par réaliser une union étroite entre la science et l'industrie : c'est la première condition de toute entreprise féconde.

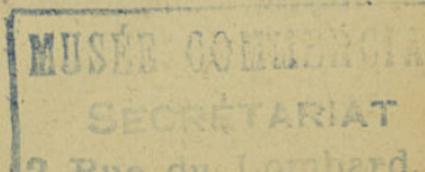
Sur l'initiative de M. H. Le Chatelier, l'Académie des Sciences a donné l'appui de sa haute autorité à la création, en France, d'un Laboratoire national de recherches scientifiques, destiné à fournir à nos industriels les renseignements que ceux des Etats-Unis, de la Grande-Bretagne et de l'Allemagne trouvent auprès

d'organismes de recherches tels que le *Physical Laboratory*, le *Bureau of Standards*, le *National Research Council*, l'*Advisory Council*, le *Physikalische Technisches Reichsanstalt*. Que nos Sociétés d'ingénieurs et nos Revues techniques prennent aussi exemple de l'*Engineering*, qui avait inauguré une série de conférences, consacrées aux *Unsolved problems*, aux problèmes non résolus de telle ou telle industrie. Nous sommes entrés dans cette voie : rappelons en particulier qu'il se publie, sous le patronage du Ministère de l'Instruction publique, un *Bulletin mensuel de la Direction des Recherches scientifiques et industrielles*¹. Des séries de conférences, déjà organisées avant la guerre, vont être reprises.

Voici en quels termes M. H. Le Chatelier a tracé le rôle industriel du savant :

« Les savants doivent se garder de la tendance de désertier la science véritable pour se livrer à des tâtonnements empiriques, et essayer de mettre eux-mêmes sur pied de véritables procédés industriels. C'est là une erreur complète. Faute d'être documentés sur les essais innombrables déjà faits dans les usines, ils redécouvrent des choses archiconnues et perdent leur temps à des tâtonnements que des ingénieurs ou des contre-maîtres feraient aussi bien et mieux qu'eux. Leur rôle doit se borner à étudier les lois scientifiques

1. Le n° 5 a paru en mars 1920; imprimerie Lahure, Paris.



des phénomènes élémentaires appliqués par les industriels, et à ces derniers incombe le soin de tirer parti des documents ainsi mis à leur disposition¹. »

Ces paroles de l'éminent maître seront entendues et méditées, non seulement par les hommes de science, auxquelles elles s'adressent directement, mais encore par les inventeurs, qui gravitent autour d'eux ; ceux-ci devront se garder de vouloir tout modifier et perfectionner, en forçant quelquefois les possibilités d'une technique trop rationnelle ; qu'ils localisent plutôt leurs efforts suivant des directions déterminées, avec constance, et sans les disperser outre mesure, s'ils veulent les rendre fructueux.

Ces remarques faites, passons en revue les procédés qui sont préconisés pour assurer l'économie du combustible pour ainsi dire automatiquement, et par le fait même plus sûrement. Mais je demanderai d'abord la permission de signaler quelques exagérations commises dans l'appréciation de l'état actuel des choses. Passons sur ces descriptions tendancieuses dans lesquelles une critique pessimiste se complait : on nous fait voir des cheminées d'usines, dégageant de longues volutes de fumées noires et épaisses, chargées de carbone et d'hydrocarbures, témoignage de combustions défectueuses, rejetant dans l'air

1. *Comptes rendus de l'Académie des Sciences*, 29 janvier 1917.

des gaz à 350°; des soupapes laissant bruyamment échapper des tourbillons de vapeur, des canalisations mal isolées, des scories formées d'escarbilles utilisables, des parois rayonnant du calorique irrémédiablement perdu, des machines surchargées, à détente insuffisante, sans régularité, des moteurs d'un rendement dérisoire, etc.; ce sont des horreurs économiques qui existent assurément, mais que j'ai rarement observées, attendu qu'elles sont ou bien accidentelles ou bien réellement exceptionnelles.

Dans une de nos plus grandes Revues, j'ai découpé les lignes suivantes dans un article sorti d'une plume autorisée : « Tout compte fait, la dépense de charbon par cheval-heure peut souvent être réduite à la moitié, quelquefois au tiers, par substitution de Centrales aux moteurs particuliers ¹. » Heureuses Centrales ! Y aurait-il une thermodynamique spéciale pour elles ? Un autre, auteur d'un livre généralement fort bien documenté, affirme que la commande individuelle électrique permet d'obtenir sur les transmissions mécaniques une économie d'énergie qui peut atteindre 50%; il ne connaît donc pas les rendements obtenus par les transmissions par câbles, et je l'invite à visiter nos filatures, dans lesquelles nous lui ferons voir des cages à câbles dont le fonctionnement est extrêmement économique. On a dit aussi que les plus grands

1. Ces lignes ont été écrites en 1918.

établissements avaient intérêt à devenir les clients des marchands d'électricité, jusqu'à des puissances de plusieurs mille kilowatts : cette proposition pourrait être admise dans sa généralité pour 100 ou 200 kilowatts, mais au delà, c'est une question d'espèce, qui exige un sérieux examen dans chaque cas particulier. Arrêtons notre attention sur ce dernier point, qui est d'une importance primordiale aujourd'hui.

C'est par des grandes distributions d'électricité que de nombreux ingénieurs espèrent résoudre le problème de l'utilisation du combustible. Ils partent du principe incontestable que les facilités du transport de l'énergie, sous sa forme électrique, mettent cette énergie à la disposition de toutes les industries dans des conditions de simplicité et de commodité remarquables, et ils ajoutent que c'est en passant par l'électricité que l'on opère les transformations de l'énergie calorifique en énergie mécanique avec le minimum de déchet, ce qui est exact en beaucoup de cas, sinon en tous. Voici quels sont les projets formés. On commencerait par relier et interconnecter tous les réseaux actuellement existants, en unifiant (on dit en standardisant) les caractéristiques de leur courant, de manière à permettre leur conjugaison ; on compléterait les circuits ainsi obtenus en y joignant certaines lignes et en y insérant de nouvelles stations hydroélectriques et thermiques. La France se trouverait de la sorte couverte d'une toile d'araignée, dont les fils passeraient

par les points les plus favorables à une distribution fructueuse, et sur laquelle seraient installées les stations hydro-électriques et thermiques aux endroits d'élection. Ces points seraient choisis de manière à procurer le maximum de rendement: dans les Alpes, les Pyrénées, sur le Rhin, pour utiliser la houille blanche des glaciers, sur le Plateau central pour la houille verte des rivières, sur les côtes de la mer (nous en avons 1.500 kilomètres) pour la houille bleue des marées, dans le voisinage des puits de mines, près des ports d'importation, pour supprimer les transports de charbons. En plus de Centrales énormes, du type américain, on en créerait de plus petites, à titre auxiliaire, pour capter sur leurs parcours des énergies hydrauliques perdues, ou pour utiliser sur place des houilles inférieures ou d'autres combustibles, dont la valeur ne tolère pas les frais de voie de fer ou de voie d'eau. Cette conception est simple, logique et rationnelle; elle n'est pas neuve, et elle aurait dû être entreprise et réalisée depuis longtemps. Il est toujours temps de bien faire.

Mais c'est le vieux jeu; il ne conduira pas aux importantes économies qu'impose la situation présente!

Pour aboutir à des résultats plus considérables, il faut, dit-on, abandonner les anciennes méthodes de combustion, renoncer aux routines du passé, et renouveler entièrement cette partie de la technique.

On distillera les houilles, en les cokéfiant et en recueillant tous les produits de l'opération.

La base de la thèse des réformateurs est essentiellement simpliste : la combustion de la houille dans des foyers, telle qu'elle est habituellement pratiquée, est une véritable barbarie, attendu qu'elle fait perdre de précieux produits, aisément récupérables, et notamment des goudrons, des benzols, des produits azotés et des brais ; les uns sont eux-mêmes des combustibles, les autres ont une valeur vénale intrinsèque : il faut les recueillir pour les utiliser au mieux. Le moyen à employer, calqué sur celui des cokeries et des usines à gaz, consiste à distiller d'abord la houille crue et à produire du coke d'une part, de l'autre des gaz, du benzol, du goudron, du brai, éléments combustibles ou transformables, et des produits ammoniacaux : on pourra même reprendre le coke incandescent pour récupérer sa chaleur sensible ; il ira directement du four au gazogène. Et l'on calcule de substantielles économies.

Le procédé est assurément plein de promesses : la génération des Ebelmen, des Thomas et Laurens, des Siemens et des autres les avaient déjà signalées, il y a cinquante ans. Mais on veut faire mieux, ce qui est louable ; on veut surtout généraliser la méthode, ce qui est encore à recommander, mais demande à être étudié et discuté.

M. Métivier s'est complu à établir le bilan de ces opérations : une tonne de houille peut donner 300 m³ de gaz de distillation à 4.500 calories,

2.800^{m3} de gaz de gazéification¹ à 1.100 calories, 5 kg. de benzol, 10 kg. d'huiles lourdes et 16 de brai, dont le pouvoir calorifique respectif est de 9.500, 8.500 et 8.500 calories, au total 4.035,5 milliards de calories, soit la moitié seulement des calories de la houille crue; mais les combustibles artificiels engendrés, et surtout les gaz, sont susceptibles d'une utilisation tellement supérieure dans les foyers et dans les moteurs à gaz que l'on gagnerait finalement tout de même 32,5 % de puissance². En d'autres termes, la première transformation ne donnerait que moitié des calories originaires, mais cette moitié serait acquise sous des formes dont l'utilisation thermique ultérieure procurerait quand même un bénéfice final; on fait ressortir à l'appui de cette conclusion si optimiste les avantages d'une combustion complète, par la quantité d'air strictement nécessaire, la suppression des pertes dues à un excès d'air, aux escarbilles, etc. On conclut à la création, sur un mode moderne et dans des conditions remarquables d'économie, de vastes usines à gaz et de supercentrales électriques. M. Métivier entrevoit d'ailleurs une rénovation des procédés archaïques du chauffage domestique et une grande amélioration des installations produisant la puissance motrice dans un

1. Les Allemands font usage pour désigner la distillation et la gazéification, des deux mots *Entgasung* et *Vergasung* dont l'opposition des préfixes est significative.

2. Voir le *Génie Civil*, 4 octobre 1919.

grand nombre d'établissements industriels et agricoles. Bien que les opérations envisagées ne s'appliquent qu'à certaines catégories de houilles, riches en matières volatiles, donnant un coke compact, ne renfermant pas trop de cendres, le savant ingénieur est plein de foi dans l'avenir et il croit fermement au succès de la nouvelle méthode d'emploi de la houille française.

On peut adopter ses conclusions, sous bénéfice d'une confirmation industrielle, qui corrigera peut-être quelques conclusions trop optimistes, mais démontrera la légitimité des vues générales.

Son rapport a été présenté au Comité général des pétroles et combustibles, qui a édifié aussitôt un immense programme sur les bases indiquées ci-dessus.

Ce programme appelle des réserves.

A titre d'exemple, M. Métivier avait étudié une application à faire dans les 4 départements de la Brie et de la Beauce, qui consommaient avant guerre 2 millions de tonnes de houille par an. Les installations comprendraient des fours à coke, des gazogènes, des appareils de récupération, une station centrale, des canalisations de gaz, des lignes électriques, etc., dont le prix se serait élevé avant guerre de 260 à 280 millions ; les dépenses annuelles avaient été estimées à 56-76 millions de francs contre 75-103 millions de recettes. Le *Génie Civil* déclare qu'il y a là de quoi satisfaire les esprits les plus entreprenants. Nous

partageons entièrement cet avis, mais nous trouvons aussi qu'il y a de quoi effrayer les gens timorés.

En effet, pour la France entière, qui consommait 64 millions de tonnes annuellement, le capital à immobiliser serait 32 fois plus considérable, et on peut l'évaluer à 9 milliards de francs au moins, valeur 1914, soit à 30 milliards dans les circonstances présentes.

Où trouver ces capitaux ? Qui les garantira contre tous les aléas que comportera fatalement une telle entreprise ? Et à quel prix les administrateurs de l'affaire vendront-ils à leurs clients le kilowatt-heure produit ? Ce prix de vente devra couvrir tous les frais d'exploitation, les charges d'intérêt et d'amortissement, et rester avantageux pour l'acheteur, petit et grand, comme pour le vendeur.

A ces questions, la réponse est toute prête. Il s'agit de la « création d'une industrie spéciale ayant l'indépendance thermique nationale pour but » ; c'est ainsi qu'elle est spécifiée dans le rapport : il appartient donc à l'Etat d'intervenir. Lui seul d'ailleurs est à même de le faire.

Mais continuons le raisonnement. Si l'Etat intervient, cette chose deviendra sienne, et, nationalisée, elle sera l'objet d'un monopole. Et voilà que l'Etat, non content d'être fabricant et marchand de tabac et d'allumettes, de poudre de chasse et de guerre, et de cartes à jouer, d'exploiter les postes et télégraphes et une ligne de

chemins de fer, d'être le grand importateur et répartiteur de combustible, va encore se faire marchand d'électricité!

Un député de la Chambre défunte a eu la franchise de poursuivre le raisonnement et de conclure. C'est le « moyen le plus sûr, a-t-il dit, de préserver l'industrie nationale des dangers que lui fait courir et qu'aggrave chaque jour la persistance de la crise du charbon » ; « l'Etat fournira, à bas prix, l'énergie électrique, partout où les réseaux de distribution pourront atteindre » ; les industriels resteront libres de prendre du courant ou de n'en pas prendre, mais ceux qui ne s'abonneront pas au secteur sont prévenus que l'on ne fournira de charbon, « pour la puissance motrice, que là où les chaudières les plus modernes et les plus économiques seront installées ».

Amenée à ce point, la question du combustible échappe à la compétence des techniciens : aux économistes à la discuter. Pour moi, je crois que l'économie ne s'impose pas aisément et ne se décrète pas, et je l'attends de l'initiative privée, guidée par son intérêt et sa bonne volonté, évoluant en pleine liberté : nous allons étudier maintenant les éléments dont elle dispose, les moyens qu'elle peut employer et les résultats qu'on peut attendre de son initiative.

II

LA HOUILLE, SES SUCCÉDANÉS ET SES ADJUVANTS

La France manque de houille. Le fait se révèle actuellement à nous dans sa douloureuse réalité; il faut absolument et d'urgence que nous tirions de notre sol ce que nous saurons y trouver, et que nous y découvriions et exploitions de nouveaux gisements, s'il en existe; on s'ingéniera ensuite à remplacer la houille noire par d'autres combustibles de chez nous, ou par autre chose d'équivalent, surtout par des houilles d'autre couleur. Ce sont trois moyens de suppléer dès maintenant à la disette dont nous souffrons tous, particuliers dans nos habitations, et industriels dans nos usines. Ces considérations feront l'objet de la triple étude qui va suivre.

*
**

Nous occupons un rang modeste dans le monde, au point de vue de la production charbonnière : le Congrès géologique, tenu en 1913 à Toronto, dans le Canada, estimait nos réserves à 17 milliards de tonnes, contre 189 à l'Angleterre et 423 à l'Allemagne. Notre extraction annuelle était d'environ 41 millions de tonnes,

alors que les Anglais en produisaient 230 et les Allemands 192, auxquelles ils joignaient 89 millions de tonnes de lignite. Or, nos mines du Nord et du Pas-de-Calais fournissaient les deux tiers de notre production : systématiquement ravagées par l'ennemi, elles ne rendront pas leur plein avant cinq ou six ans, si ce n'est plus. Ne serait-il point possible de récupérer par nos autres mines de France le déficit résultant de cette odieuse destruction, opérée dans le pays occupé? C'est la première question que nous devons nous poser.

Rendons-nous compte des ressources dont nous disposons en dehors de nos départements septentrionaux.

Nous avons quatre bassins, plus ou moins compacts, dits de l'Est, du Centre, du Midi et de l'Ouest.

Bassin de l'Est. — La mine de Ronchamp, dans la Haute-Saône, constitue un gisement isolé, qui donne un charbon de bonne qualité, riche en matières volatiles, qu'il faut chercher à une assez grande profondeur, sous une double superposition de grès rouges et bigarrés des Vosges. Plus au Sud, dans la région des Alpes, dans l'Isère, à la Mure, au bourg d'Oisans, et en beaucoup d'autres endroits aux noms peu connus, on extrait des houilles maigres et anthraciteuses, souvent pierreuses et très cendreuses, d'un allumage difficile, d'un emploi ingrat, qui

présentent l'inconvénient de décrépiter au feu; il y a avantage à façonner leurs menus en boulets. Certaines variétés conviennent bien aux gazogènes. La guerre a appris à utiliser ces produits, trop méprisés jusqu'alors. La Maurienne, la Tarentaise et le Briançonnais produisent des qualités analogues.

Bassin du Centre. — Dans le département de Saône-et-Loire, les houillères du Creusot, de Blanzky, de Decize, de Montchanin, de Longpendu, d'Epinac, de la Chapelle-sous-Dun, de Montceau-les-Mines et de Berain, etc., nous offrent toute la gamme des charbons de terre, depuis l'antracite jusqu'aux demi-gras, aux gras et aux produits les plus flambants; dans la Loire, à Saint-Etienne, Rive-de-Gier, Saint-Chamond, Montrambert, Firminy, etc., on extrait aussi des combustibles riches en matières volatiles, mi-gras à courte flamme et gras à longue flamme; il en est de même dans la Haute-Loire, où les exploitations de la Taupe, de Marsange, donnent de bonnes qualités pour coke. Le Beaujolais, le Roannais et l'Auvergne sont plutôt des régions à anthracites. Par contre, la Compagnie de Commentry tire de ses concessions des gras propres à la forge et à la fabrication du gaz; on extrait aussi des houilles de valeur, dans l'Allier à Bourbon-Saint-Hilaire, dans le Puy-de-Dôme à Brassac, à Mermeix et à la Bouble, dans le Cantal à Champagnac, dans l'Aveyron à Aubin et

Decazeville, dans le Tarn à Carmaux et Albi. La plupart de ces gîtes présentent une certaine importance qu'il est inutile de faire ressortir, car elle est bien connue.

Bassin du Midi. — Il comprend les houillères du Gard (Bessèges, la Grand'Combe, Cessous, Alais, etc.), dont les gras sont estimés ; à Graissèsac (Hérault), Prades (Ardèche), nous retrouvons une prédominance de maigres et d'anthraciteux. En Provence, la caractéristique est surtout ligniteuse.

Bassin de l'Ouest. — La Sarthe, la Mayenne, les régions de la Basse-Loire exploitent des couches maigres, cendreuses, dont la teneur en matières volatiles augmente, plus on avance vers la mer ; nommons Mouzeil, Maupertuis, Montrelais, les Touches. Les mines de Vendée, à Vouvant et Faymoreau, donnent aussi un charbon riche en matières volatiles, malheureusement cendreuse. Il y a des espérances sérieuses de charbon dans la Manche.

En somme, ces divers charbonnages fournissent annuellement au pays 13 millions de tonnes de combustibles de toute nature, de propriétés assurément fort différentes, mais dont la qualité est en général supérieure à leur réputation : nos compatriotes d'en dessous de la Loire regardent trop vers le Nord et le Pas-de-Calais, et ne s'occupent point assez de ce qui se trouve sous leurs

pieds. Il serait intéressant de connaître les quantités de chaque espèce sorties de nos nombreux bassins de second ordre, mais cette donnée statistique nous manque et c'est regrettable à tous égards. Quoi qu'il en soit, et quelle que soit la proportion de maigres et d'anthraciteux dans notre production nationale, nous sommes convaincus que notamment nos charbons du Sud-Est et de l'Ouest pourraient être mieux et plus largement utilisés qu'ils ne le sont, et nous rappellerons ce qu'écrivait autrefois un de nos professeurs de l'École Centrale, Amédée Burat : « L'industrie moderne, n'eût-elle eu à sa disposition que des anthracites, aurait pu se développer et arriver aux résultats obtenus aujourd'hui : l'Amérique du Nord en a donné la preuve, en créant et en développant sa métallurgie du fer, la plus difficile de toutes, avec les anthracites de Pensylvanie ¹. » Il est vrai que les anthracites américaines décrépitent moins que les nôtres, et qu'elles donnent moins de cendres ; l'opinion favorable de Burat était néanmoins à signaler et je la crois bonne à retenir. Elle témoigne de l'intérêt que nous aurions à intensifier l'extraction dans tous nos bassins, même dans ceux qui sont le moins qualifiés. Si nos mineurs consentaient à imiter leurs camarades belges du Borinage et du pays de Charleroi, qui ont consenti à faire *pour nous*, après les 8 heures légales

1. Amédée BURAT : *Minéralogie appliquée* (Librairie polytechnique, Paris et Liège, 1864), page 147.

(en France on n'en fait réellement pas même 7), deux heures supplémentaires, la crise dont nous souffrons tant pourrait être dès maintenant atténuée.

D'autre part, le développement des moyens d'extraction, lequel ne peut être réalisé immédiatement, mais auquel on devrait aviser d'urgence, assurerait notre avenir dans une certaine mesure et nous rendrait moins tributaires de l'étranger. Nous n'avons pas fait dans le passé ce que nous aurions pu et dû faire, et ce qu'ont fait d'autres, plus entreprenants que nous; au cours des soixante dernières années, notre production avait à peine quadruplé, alors que celle de l'Allemagne décuplait. L'initiative privée n'est pas seule responsable de notre infériorité, car, loin de favoriser les recherches, on les décourageait en n'accordant pas certaines concessions sollicitées. Dans un pays comme le nôtre, le sol a été tellement étudié qu'on ne peut espérer découvrir un bassin nouveau, mais il en est dont toute l'épaisseur, ni toute l'étendue n'ont pas encore été suffisamment explorées : on ne connaît un gisement que lorsqu'on est arrivé aux formations inférieures au terrain houiller, et qu'on a recoupé ce que les mineurs ont appelé si expressivement le « rocher d'adieu ». La recherche des couches sous les morts-terrains superposés a maintes fois été fructueuse. C'est vers les années 45 à 50 qu'un hasard heureux, préparé par de solides études, fit retrouver au delà de

Douai des veines du bassin du Nord, qu'une inflexion avait fait perdre, et donna à la France le riche bassin du Pas-de-Calais. Les couches du bassin de la Sarre se prolongent au-dessous des grès vosgiens de la Moselle, sous un angle de 30 à 40°; des recherches exécutées vers 1846 à Stiring, à Petite-Rosselle, et vers Saint-Avold et l'Hôpital permirent de recouper les couches de Geislautern et de Gerswiller, et donnèrent naissance à nos houillères de Stiring, de Carling et de la Houve, dans le département de la Moselle, dont la guerre de 1870 nous avait dépouillés et que la victoire vient de nous restituer¹. Les limites du bassin ne sont pas encore définies, et les sondages des environs de Pont-à-Mousson permettent d'espérer quelques résultats. Une faille, venue de Petite-Rosselle, a provoqué un rejet que l'on connaît aujourd'hui. Une judicieuse observation faite par mon distingué collègue des Facultés Catholiques de Lille, M. le chanoine Bourgeat, porte à croire qu'il s'est formé du charbon dans le massif de la Serre, qui s'élève au Nord-Est de Dôle-du-Jura et jalonne un pli souterrain de Ronchamp au Creusot. Les zones du Creusot et de Blanzly appartiennent à un même bassin, dont la jonction est à chercher sous les grès qui le recouvrent; des sondages effectués sur la rive droite de l'Arroux montrent déjà que ce bassin

1. Voir mon article de la *Technique Moderne* (mai 1919), intitulé : *Les Ressources industrielles de l'Alsace-Lorraine*.

se prolonge parallèlement à celui de Blanzly et de Montceau-les-Mines. On a trouvé de la houille dans la Nièvre, dans le Bourbonnais, et à Colombier, près de Commentry. Tout fait supposer que le nord-est du Massif Central recèle des richesses importantes.

A l'est et au sud-est de Lyon, on a recoupé, sur la rive gauche du Rhône, le prolongement du bassin houiller de la Loire. Il est permis d'espérer que l'on y pourra créer quelques exploitations fournissant plusieurs centaines de mille tonnes chacune, en prenant la houille à une profondeur moyenne de 500 mètres.

Dans le Gard, on est justifié à croire que de belles réserves sont enfouies sous les terrains secondaires. En Savoie, une bande de 160 kilomètres de longueur sur 7 de largeur produit un affleurement de près de 100.000 hectares, duquel le professeur Kilian, de Grenoble, a dit que ce champ « peut être considéré comme équivalent en surface à tous les bassins houillers français actuellement exploités » ; il n'a d'autre défaut que d'être situé à une altitude de 600 à 2.000 mètres et de présenter une allure désordonnée, qui rend son exploitation difficile. En somme, la France paraît receler dans son sous-sol plus de charbon qu'on ne l'a cru jusqu'ici : une prospection rigoureuse s'impose et il nous faudrait un esprit d'initiative et de détermination, qui nous a peut-être manqué dans le passé. Le moment est venu d'en faire preuve.

Mais il s'agit surtout, pour le moment, d'utiliser nos ressources actuelles et d'en tirer parti ; la guerre nous a aiguillés sur une voie qui peut nous conduire assez loin, en nous amenant à employer des charbons dédaignés dans le passé : tels sont notamment ceux de la région alpine. On réussira, en effectuant un meilleur triage sur le carreau des mines, en pratiquant d'habiles mélanges pour aider les maigres à s'enflammer, en agrandissant la surface des grilles, en substituant au tirage naturel d'actives souffleries par ventilateur, en installant des grilles mécaniques, appropriées à la nature des combustibles, en faisant surtout l'éducation des chauffeurs : on a obtenu de la sorte dans les usines des environs de Lyon, de Grenoble et de Marseille des résultats inattendus, qui devraient être publiés et commentés pour provoquer partout des tentatives analogues. Ce rôle appartient à l'Administration des Mines, aux Sociétés Industrielles et aux Associations de propriétaires d'appareils à vapeur, qui savent le remplir.

* * *

Nous disposons aussi en France de succédanés de la houille, auxquels nous devons largement recourir dans notre détresse ; *benesuada fames*. La faim devient bonne conseillère.

Nous ne parlerons du bois que pour mémoire.

Le bois a été le premier des combustibles employés, le seul employé pendant de longs siècles.

Mais il n'entre plus guère en ligne de compte dans notre pays déboisé, qui voit disparaître ses dernières forêts et suffit à peine à l'industrie insatiable du papier : un grand quotidien nous prive chaque année d'une forêt. Un stère de bois, soit 450 kgr., est le produit de 1.600 mètres carrés de terrain : on compte 2.875 kgr. par hectare.

M. Métivier estime à 8.500.000 tonnes de bois la consommation française annuelle : leur combustion fournit à peine le vingtième des calories engendrées dans nos foyers.

La tourbe et le lignite mettent encore moins de calorique à notre service, mais ces produits pourraient nous en donner beaucoup plus, ainsi que je vais le démontrer.

La tourbe a été trop négligée en France : la surface totale de nos tourbières atteint 38.000 hectares, répartis dans 22 départements, parmi lesquels la Loire-Inférieure, la Somme, le Finistère, les Basses-Alpes, le Pas-de-Calais, l'Oise, l'Aisne et la Manche tiennent le premier rang : or, nous n'en avons utilisé, en 1913, que 60.000 tonnes.

Nous devons prendre exemple sur la Russie, la Suède, le Danemark, la Hollande, et surtout l'Allemagne. Il est vrai que la Russie possède 46 millions d'hectares, la Suède et la Norvège 8 millions et l'Allemagne 25 millions et que ces pays sont par conséquent plus intéressés que nous à tirer parti de ce combustible inférieur, mais le moment est venu de faire feu de tout ce qui peut brûler.

Ce n'est qu'un combustible inférieur; en effet, une tourbe de qualité ordinaire renferme 10 % de cendres et 25 % d'eau, après qu'elle a séché à l'air, et son pouvoir moyen est voisin de 3.500 calories : il faut donc deux tonnes de tourbe pour produire le même effet qu'une tonne de houille, et que 1.200 kgr. de bois. Toutefois les tourbes de la Somme et d'autres encore possèdent une valeur calorifique plus élevée. Etant donné que notre sol recèle un milliard de mètres cubes de tourbe, nous pourrions trouver dans cette importante provision un secours immédiat à notre détresse, et la puissance de ces réserves est suffisante pour donner lieu à de grandes installations de traitement.

Il est rare, en effet, que la tourbe puisse être utilisée telle quelle comme combustible; il faut la sécher, quelquefois la malaxer, puis la comprimer et la façonner en briquettes ou en bûches cylindriques. En Suède, on fabrique couramment un poussier de tourbe, dont on évaluait la valeur à 11 francs la tonne, et qui présentait l'avantage d'éviter les frais de moulage¹.

La tourbe n'est plus guère employée au chauffage domestique, mais elle est devenue un combustible industriel, dont on aurait tort de méconnaître les avantages. Elle brûle très bien sur des grilles à échelons, inclinées à 36° sur

1. Cf. COLOMER et LORDIER : Combustibles industriels (Paris, Dunod et Pinat, 1919), page 301 et suiv.

l'horizontale, auxquelles on peut adjoindre des chargeurs Godillot, avec transporteur hélicoïdal à augets de volume croissant, évitant tout engorgement. A la Poudrerie nationale de Pont-de-Buis (Finistère), on a obtenu des résultats satisfaisants sur une grille Babcock et Wilcox, à chargement et décrassage automatique, avec soufflage par ventilateur : signalons comme particularité très intéressante de cette application qu'elle a permis de brûler les produits d'une tourbière drainée, renfermant 40 % d'eau, qu'on n'avait pas eu à sécher autrement. Les Chemins de fer de l'Etat suédois ont créé une locomotive à poussier de tourbe, dont le foyer est caractérisé par un compartimentage en matières réfractaires ; on est obligé d'entretenir un feu de houille pour la mise de feu du combustible pulvérulent, et malgré cela le rendement est resté avantageux : les Chemins fédéraux suisses vont adopter le système.

Mais il semble que le gazogène soit le meilleur appareil d'emploi de la tourbe, car il se prête à l'utilisation de tous ses éléments thermiques et chimiques et donne lieu à une récupération largement rémunératrice. Par distillation, on obtient généralement par tonne 400 m³ de gaz, 65 kg. de goudron, dont on extrait de la benzine, des huiles de graissage et d'éclairage, de l'acide phénique, de la créosote, de la paraffine, etc., et 400 kg. de coke, sans compter des produits ammoniacaux, dont on fait 80 kg. de sulfate

d'ammoniaque. Malheureusement, la captation des goudrons offre certaines difficultés, et Lencauchez qualifiait ces produits du nom pittoresque de « goudrons vésiculaires vagabonds ». Par gazéification, on fabrique un gaz à l'eau qui n'exclut pas la récupération, dans les appareils Mond, Riché, Chavanne, Pegg, Kørting et autres : le gaz renferme en volume environ 10 d'hydrogène, 18 d'oxyde de carbone et 2 de méthane.

On a enfin essayé ce qu'on a appelé l'électrification des tourbières, c'est-à-dire l'installation dans leur voisinage de centrales électriques ; en appliquant l'électricité à l'exploitation du gisement, on rendrait à l'agriculture en peu d'années un sol couvert de marécages et l'on assainirait les régions environnantes. Mais ce sont là des projets dont la réalisation n'est pas prochaine.

Rappelons, pour finir, que la Chambre invitait, dans sa séance du 11 juin 1917, le Gouvernement à organiser d'urgence par tous les moyens possibles, au besoin par réquisition, et à mettre en exploitation les tourbières de France : une Commission fut nommée sur l'heure, formée de 4 sénateurs, 8 députés et 6 délégués de l'Administration. La Commission a dû siéger et agir : je ne sais ce qu'elle a effectivement réalisé.

La France a extrait, en 1913, 793.000 tonnes de lignite, d'un pouvoir calorifique supérieur variant de 3.500 à 5.500 calories. En 1908, l'Allemagne en produisait 68 millions et, en 1915, près

de 89 millions. Son exemple aurait dû être suivi par nous, et nous eussions été bien inspirés. Nos réserves sont estimées en effet à 2 milliards de tonnes, celles de notre ennemi à 8 milliards ; il avait donc 4 fois plus de disponibilités que nous, mais son extraction était le centuple de la nôtre ! La fabrication des briquettes est devenue une source de richesse pour la province rhénane¹. Le lignite pouvait faire la fortune de plusieurs de nos régions, déshéritées d'ailleurs, et nous disposerions aujourd'hui de quelques millions de tonnes de combustible, qui nous viendraient bien à point.

Vingt-cinq de nos départements possèdent des gisements de lignite ; il abonde surtout dans le Sud-Est, dans l'Isère, les Basses-Alpes, les Bouches-du-Rhône, le Gard, l'Aveyron, l'Ariège, le Vaucluse, etc. L'Alsace en fournit dans le Bas-Rhin, aux environs de Pechelbronn, localité connue par son pétrole, mais il s'y présente sous une forme bitumineuse, d'un pouvoir calorifique très élevé, d'une utilisation difficile dans les foyers ; celui des Landes et de l'Aisne est de même nature.

1. L'Allemagne possède deux variétés de lignite, appelées *Schwartzkohle* et *Braunkohle*, d'après leur couleur ; elle en a méconnu la valeur jusque vers 1880, époque à laquelle s'est créée et remarquablement développée la fabrication des briquettes comprimées, qui corrige tous les inconvénients de ces produits sans cohésion et de faible pouvoir calorifique. Pour plus de détails sur ce sujet, voir l'article de D. BELLET : L'utilisation du lignite comme combustible, dans la *Rev. gén. des Sc.* du 28 février 1917, p. 118.

Les lignites des Bouches-du-Rhône, à Fuveau, de l'Isère, à la Tour-du-Pin, du Gard, à Saint-Paulet, de Vaucluse, à Méthamis, et d'autres encore, notamment de l'Aveyron, à Milhau, sont de bons combustibles pour les foyers domestiques (malgré leur odeur souvent peu agréable), les chaudières et les gazogènes. Ils ont souvent besoin de passer au séchoir, car ils peuvent renfermer jusqu'à 45 % d'eau; mais il en est qui s'emploient sans préparation, comme du charbon maigre, à côté duquel ils sont placés dans la classification de Grüner. Leur teneur en matières volatiles dépasse quelquefois 42 %. La quantité de cendre varie beaucoup.

On agglomère les lignites, par une pression à froid de 1.000 à 1.200 kg. par cm^2 , sans addition d'agglomérant; en Amérique, on les soumet à une demi-distillation, avec récupération des sous-produits, et l'on façonne ce qui reste en boulets ovoïdes; on les distille, pour en faire du coke (40 %) et du goudron (12 %); on les gazéfie par gazogène, le gaz étant employé en moteurs ou brûlé en foyers spéciaux. Les Allemands, desquels nous avons tant à apprendre en fait de traitement des lignites, réunissent ordinairement dans un même établissement les appareils d'agglomération, de distillation et de gazéification, et ils utilisent les gaz pour leur puissance motrice. Les meilleures briquettes ne se payaient pas plus de 20 marcs, soit 25 francs, en 1913.

Il faut savoir que les sous-produits de la

distillation ne valent pas ceux qu'on extrait de la houille et que les goudrons, appartenant surtout à la série grasse, sont généralement difficiles à condenser et à séparer. Lencauchez avait signalé à maintes reprises cette infériorité des lignites.

Une tonne de lignite fournit moyennement 1.900 m³ de gaz à 1.200 calories, et des sous-produits qui ont à peu près la valeur vénale du produit. En installant une centrale à moteurs à gaz auprès d'une mine de lignite, on est arrivé à engendrer le kilowatt-heure au prix de 1 fr. 25 et à gagner beaucoup d'argent; c'est le cas de la station de Bitterfeld, sur le Rhin; je me serais reproché de ne pas citer cette remarquable installation, qui a coûté moins cher de premier établissement que bien des centrales hydroélectriques et fournit des résultats dont on pourrait être jaloux dans les Alpes et les Pyrénées.

*
*
*

Je ne dirai qu'un mot de l'utilisation des déchets et rebuts de l'industrie, de l'agriculture et des grandes agglomérations, mais ils doivent être mentionnés parmi les ressources combustibles du pays.

Le lavage des charbons, qui a pour but d'améliorer leur qualité, laisse en suspension dans l'eau des poussières souvent impalpables, appelées *schlamm*s, qui peuvent encore être brûlées avec profit sur le lieu de leur production, car leur valeur n'est pas suffisante pour tolérer un transport

lointain¹. Les Compagnies houillères les brûlent d'ordinaire sous leurs chaudières après les avoir débarrassées des boues, et les avoir égouttées et séchées : on a inventé à cet effet des turboclasseurs très efficaces. Nos grands charbonnages ont fait preuve d'une louable initiative dans ce genre d'installations et ils ont obtenu des résultats très satisfaisants.

Les ateliers dans lesquels on travaille le bois produisent une grande quantité de sciures, et de copeaux, que l'on peut employer dans les foyers de générateurs de vapeur, en les mêlant de charbons maigres : il suffit de disposer pour cela d'une surface de grille suffisante et il est prudent de diminuer le tirage pour éviter l'entraînement de flammèches incendiaires. Souvent on installe des foyers spéciaux à sciure ; on arrive de la sorte à produire 3 kg. de vapeur par kg. de sciure : la société Balcock et Wilcox s'est fait une spécialité de ce genre de foyers. Il existe aussi des gazogènes qu'on peut alimenter de déchets de bois : tels sont les appareils Riché, dont les marchands de bois de Calais se sont fort bien trouvés. Enfin il nous est venu de Suède un procédé de fabrication de briquettes de sciure, dans lesquelles l'agglutinant est constitué par le goudron provenant des gazogènes : 4 m³ de ces briquettes équivalent à 3 m³ de bon charbon moyen ; elles

1. Avant la guerre, sur le Nord, le transport d'une tonne revenait à 2 francs pour 50 kilomètres et à 3 fr. 88 pour 100 kilomètres.

peuvent être assimilées au lignite. On les emploie dans l'industrie, pour le chauffage des chaudières, et elles conviennent, dans l'économie domestique, au service des foyers d'appartements et des cuisinières.

M. Chaptal, chef des travaux de l'Ecole d'Agriculture de Montpellier, a bien voulu nous signaler l'intérêt que présenterait la distillation sèche des sarments de vignes : les propriétaires en sont embarrassés et ils les brûlent le plus souvent dans les chemins sans en tirer aucune utilité. Or, chaque hectare en produit annuellement une moyenne de 1.500 kilos : il s'agit donc d'une quantité considérable pour nos régions viticoles du Midi. La distribution permettrait de fournir du charbon de bois à une contrée qui en manque et d'obtenir de plus de l'acide acétique, qui servirait à la fabrication de produits anticryptogamiques.

La tannée est un résidu industriel qui peut aussi servir de combustible.

Le foyer Godillot se prête à son emploi, à sa sortie des fosses : son aménagement donne lieu à une assez forte dépense initiale, qu'on amortit rapidement par l'économie réalisée. En mêlant de la tannée au dixième de son poids de charbon, on arrive à engendrer 15 kg. de vapeur par 10 kg. de mélange.

Ce même foyer permet de brûler les résidus de canne à sucre (les bagasses), les marcs de raisin, les déchets de lin, etc., voire même les ordures

ménagères ou gadoues. Celles-ci sont souvent aussi traitées en gazogènes Riché, Pierson, Boutillicr et autres. La combustion des gadoues a surtout été pratiquée en Amérique et en Angleterre, où nos administrations municipales auraient beaucoup à apprendre de l'art de se débarrasser des détritns de la vie, pour le plus grand bien des santés et pour le bénéfice des finances de nos cités.

*
* *

Les huiles, et tout particulièrement celles qui dérivent du pétrole, pourraient devenir de puissants adjuvants de la houille. Le Ministère des Travaux Publics et le Conseil Municipal de Paris ont déclaré récemment l'urgence d'un programme d'utilisation de ces produits si riches en calories, d'un emploi si facile, et qui présentent d'autre part au point de vue économique un avantage dont on ne saurait méconnaître l'importance : si l'extraction du charbon est sujette aux conditions édictées par les syndicats et aux exigences de la main-d'œuvre, il n'en est point de même pour les pétroles, que les puits débitent jour et nuit, quelquefois par des sources jaillissantes, et en tout cas sans exiger de grandes manutentions, ni un personnel entièrement spécialisé.

Malheureusement la France n'est pas richement dotée en hydrocarbures : elle l'est néanmoins mieux que le public ne le pense. Et d'abord la réannexion de l'Alsace nous a rendu le gîte de Pechelbronn, dont on pourrait tirer annuellement

75.000 tonnes de produits divers, si l'Administration qui a pris en main cette exploitation achevait les installations projetées et commencées par la *Deutsche Erdöl Gesellschaft*. Il y a, d'autre part, en de nombreux points de notre territoire, des indices pétrolifères, dont il faudrait faire le départ de recherches suivies et bien dirigées. Je ne parlerai pas de l'Hérault, où la source de Gabian fournit depuis plusieurs siècles une huile accaparée par la pharmacie pour la confection de capsules curatives; mais la région d'Auvergne permet les plus grandes espérances, et il y aurait intérêt à exploiter ses sables imprégnés d'huile et ses bitumes de Puy-de-la-Poix, Macholles, Pont du Château, etc. Des prospections méthodiques devraient être organisées dans l'Ardèche, les Basses-Pyrénées, le Gard, la Haute-Loire, l'Isère, la Haute-Savoie, le Jura, dont les asphaltes du Val de Travers sont traitées avec profit depuis longtemps. Dans l'Ain, à Vaux-en-Bugey, un jet de gaz combustible, riche en méthane, s'échappe dans l'air sans que personne ne cherche à le capter : les Américains se gardent bien de laisser perdre ainsi leurs gaz naturels de la Pennsylvanie et de l'Ohio, qu'ils distribuent aux villes et aux industries voisines par des conduites qui mesurent jusqu'à 20 kilomètres de développement¹.

1. Voir à ce sujet l'article de M. F. MICHEL : L'Industrie du gaz naturel en Amérique, dans la *Rev. gén. des Sc.* du 15 janvier 1918, p. 13.

Nos colonies pourraient fournir à la mère patrie un riche appoint de combustible liquide. Le département d'Oran, en Algérie, à lui seul, est favorisé de trois zones pétrolifères, dont le débit a été estimé à 250.000 tonnes par an ; les raffineries de Frontignan traitent déjà 2.400 tonnes provenant de trois puits, mais ce n'est qu'un début, et nous commettrions une faute impardonnable de négliger plus longtemps cette ressource nationale. Le Maroc permet de légitimes espérances ; à Madagascar deux sociétés... anglaises poursuivent des recherches ; l'Indo-Chine présente des terrains analogues aux champs pétrolifères du Japon, de Bornéo et de Sumatra ; attendrons-nous encore que des étrangers viennent les étudier et les exploiter ?

Nous possédons aussi en France des gisements de schistes, dont nous ne savons pas tirer parti : nous pourrions en traiter annuellement un million de tonnes, et en extraire par distillation 21.000 tonnes d'huiles, 3.600 d'essence, 33.000 de goudrons, etc. ; nous n'en produisons pas le dixième ! Notre Commissaire général des essences, au retour d'une visite en Ecosse, où il avait *admiré* les établissements d'exploitation des schistes de ce pays, avait paru en rapporter d'excellentes intentions qui se traduiront sans doute par des actes. Nous avons déjà une agréable relation d'un beau voyage¹.

1. M. le ministre a déclaré que la journée vécue par lui à Broxburne et à Pumpherston avait été *capitale* ; il avait vu

En attendant mieux, nous achetons à l'étranger ce qu'il veut bien nous céder, le payant aux prix fixés par lui. S'il faut en croire M. Méti-
vier, nous consommons par an 730.000 tonnes
d'huiles brutes de pétrole et de produits de dis-
tillation et nous en produisons zéro; ce n'est
point exact, nous venons de le voir, mais n'est
malheureusement pas éloigné de la réalité.

La consommation française des huiles était
restée faible par suite des droits excessifs, de
120 francs à la tonne, dont elles étaient frappées;
leur prix de revient était dès lors au moins quin-
tuple de celui du meilleur charbon. Les droits
ont été en ces derniers temps considérablement
réduits; ils ne sont pour le moment que de
4 francs à la tonne. Si on les maintient à ce taux
l'emploi industriel des huiles pourra devenir
très avantageux.

Les huiles de pétrole, que l'on brûle, sont des
résidus de distillation plus ou moins denses et
homogènes; on leur donne aujourd'hui le nom
générique de mazouts, qui s'applique à des pro-
duits très différents. Ce sont des combustibles
de premier ordre pour foyers. Et d'abord, l'huile
lourde d'Amérique a un pouvoir supérieur de
11.000 calories, dépassant de près de 35 % celui
d'une bonne houille moyenne. Mais son utiliza-

« les cornues et les fourneaux qui transforment le caillou
noir du schiste en essences claires et en blanches paraf-
fines ». J'emprunte cette citation à la *Revue générale d'Elec-
tricité*, 19 avril 1919, page 610.

tion peut être rendue meilleure, attendu que là où la houille ne donne pas 70 %, de rendement, le mazout peut fournir 80 %. On s'en rend compte aisément en observant que le combustible liquide se prête à un réglage facile de son débit, par un simple jeu de robinets, et permet donc de réaliser une combustion complète, sans excès d'air, en proportionnant strictement les quantités relatives d'huile et d'air; on obtient une température constante, et aussi élevée qu'on veut; il ne se produit ni cendres, ni scories sur grille, et aucun décrassage des feux n'est nécessaire; la pureté des gaz brûlés supprime les encrassements par la poussière et la suie et ménage les tôles; le tirage se fait automatiquement sans haute cheminée. D'autre part, on supprime le pénible travail du chargement; un chauffeur suffit pour une batterie de plusieurs chaudières et la surveillance est aisée. Mêmes avantages pour les locomotives; joignons-y le bénéfice d'une mise sous pression rapide, et la facilité d'approvisionnement des machines: l'excellence du combustible liquide dans ce genre de foyers avait du reste été reconnue déjà sous l'Empire, grâce aux travaux de Sainte-Claire-Deville, et le souverain avait daigné s'y intéresser lui-même. A bord des navires, le gouvernement des feux est grandement simplifié et la vie devient tolérable dans les chaufferies; l'emmagasinement du combustible n'offre plus de difficultés; la suppression des fumées ou du moins leur diminution est un

inappréciable progrès, surtout pour la flotte de guerre.

Ces heureux résultats étaient obtenus d'abord en pulvérisant l'huile par un entraînement à travers un étroit orifice à l'aide d'un jet de vapeur ou d'air comprimé; dans les derniers dispositifs de brûleurs, on supprime la dépense de vapeur ou d'air, en faisant couler le mazout préalablement chauffé sous une pression de 18 à 20 kg.; l'atmosphère comburante est fournie généralement par un ventilateur. Le liquide est débarrassé de ses impuretés par un filtrage. Il faut modifier les dimensions et la forme des brûleurs suivant la nature des pétroles.

Pour la production directe de la puissance motrice, les huiles lourdes gardent la prééminence du rendement, grâce aux moteurs à combustion interne, dont nous nous réservons de parler ultérieurement.

Sous l'influence des considérations qui viennent d'être présentées, quelques esprits prompts se sont hâtés de préconiser l'emploi général des combustibles liquides, et l'on a conçu le vaste et coûteux projet d'établir immédiatement des *pipe-lines* entre les ports d'importation et les lieux de grande consommation; mais il nous faudrait en même temps construire des bateaux pétroliers, des wagons-citernes, des réservoirs, etc., toutes choses dont nous manquons encore. D'ailleurs, il ne faut pas s'illusionner sur les facilités d'application des brûleurs à pétrole aux

foyers existants, chaudières fixes et mobiles, fourneaux de forge, fours métallurgiques Martin-Siemens et autres, fours à réverbère, fours d'affinage, etc. : il y a toujours loin de la coupe aux lèvres, surtout pour les gens les plus altérés.

On ne transforme pas instantanément des foyers quelconques à charbon en foyers à huiles. Pour que la modification d'un foyer de générateur soit aisée il faut que l'avant-foyer se prête à l'installation d'une chambre de combustion.

Les capitaux prévus pour l'établissement des moyens d'adduction trouveraient mieux leur emploi dans le développement de nos usines de production, à Pechelbronn, en Algérie, en Indochine, et sur nos gisements de schistes d'Aun. Il ne manque pas en France de gens d'initiative, doués d'un esprit entreprenant; ils demandent des capitaux, de la protection, dans la mesure qui convient, et surtout de la liberté : qu'on leur donne tout cela, et au plus tôt.

Nous devons mentionner encore ici le combustible colloïdal, dont il a été fait usage au cours de la guerre, alors que les flottes alliées éprouvaient des difficultés d'approvisionnement en huiles de chauffage. Les Américains ont donné ce nom à un mélange d'huile et de charbon finement pulvérisé, dans lequel le charbon restait en suspension. On peut employer à cet effet, sans aucune préparation, les huiles de pétrole et de goudron, ainsi que toutes les variétés de charbon, voire même le poussier de coke; il suffit que le

combustible solide soit bien sec ; il peut être de qualité très inférieure. On en incorpore dans l'huile 20 % en gras ou 26 % en maigre, mais cette proportion peut s'élever à 40 %. Un fixateur dont la composition est restée secrète contribue à maintenir en suspension les particules solides. Le combustible colloïdal se pulvérise dans le foyer comme l'huile ordinaire et il y brûle dans les mêmes conditions : on a constaté que ce produit procurait une économie d'huile de 27 $\frac{0}{0}$; il a été appliqué aux Indes avec succès, au chauffage des locomotives¹.

*
* *

Si la France ne possède pas beaucoup de houille noire, elle est plus riche en houille blanche, verte et bleue ; ces mots expressifs sont suffisamment entrés dans le langage, pour que je n'aie pas à les préciser. A l'égard de ces houilles de fiction, nous devons reconnaître que notre pays n'a pas été trop mal partagé : la Suisse, la Suède et la Norvège pourraient seules lui faire envie en Europe.

La houille blanche, dont nous nous occuperons d'abord, forme un beau lot de notre apannage ; par définition, elle a son origine dans les glaciers.

1. J'emprunte ces renseignements à une étude de M. Desmarests, publiée dans la *Revue générale des Sciences*, 15 mars 1920.

Il est difficile de dire exactement quelle est la puissance hydraulique qu'elle met à notre disposition : la houille blanche se mêle en effet souvent de houille verte ; les évaluations varient d'ailleurs suivant les auteurs d'après leurs manières de voir. La discrimination entre les puissances manque même quelquefois de concordance. La puissance d'étiage devrait être calculée d'après le débit caractéristique au-dessous duquel le volume d'eau ne descend pas, pendant plus de 10 jours par an, consécutifs ou non ; elle serait donc en tout temps disponible. On avait d'abord considéré comme puissance aménageable maximum celle qui correspond au débit caractéristique moyen, au-dessous duquel le volume d'eau ne descend pas pendant plus de 180 jours par an, et sur laquelle on peut compter durant 9 mois de l'année. En prenant cette base, on restait en deçà des possibilités industrielles ; étant donné qu'on peut utiliser l'énergie périodique disponible durant 5, 4 ou 3 mois, on a donc installé plus tard des machines d'une puissance supérieure à celle que fournit le débit moyen. Il y aurait lieu de spécifier très nettement les chiffres pris comme base des inventaires ; à défaut d'un accord complet, ces appréciations des puissances disponibles et utilisées présentent de notables divergences, dont nous devons signaler la cause. L'Inventaire officiel des puissances disponibles sur les cours d'eau « du domaine public » au 1^{er} juillet 1916, dressé

et publié par le Ministère des Travaux Publics, fait état de la « puissance moyenne disponible pour l'année entière » et les chiffres sont donnés en fonction du poncelet de 100 kilogrammètres par seconde, équivalant à 1,33 cheval-vapeur. Ce travail n'est malheureusement pas terminé. M. R. de la Brosse, inspecteur général des Ponts et Chaussées, avait de son côté établi avant la guerre un tableau général pour les cours d'eau du domaine public et les autres, auquel la haute situation de son auteur et sa rare compétence donnent une grande valeur : nous nous y rapporterons de préférence.

La France entière disposerait à l'étiage de 4.600.000 chevaux et en eaux moyennes de 8 millions, sur lesquels environ 84 % proviennent des bassins du Rhône et de la Garonne, et peuvent donc revendiquer la houille blanche comme origine principale : la chaîne des Pyrénées fournirait environ le quart de ce que donne le massif des Alpes. Dans ces régions montagneuses, la majorité des chutes utilisées sont de hautes chutes, atteignant souvent 1.000 mètres et les dépassant. Les cours d'eau sont généralement torrentueux ; leur régime est glaciaire, c'est-à-dire que leurs plus hautes eaux sont atteintes en été, à l'époque de la fusion des neiges, et que leur débit passe par un minimum en décembre, janvier et février. Les usines hydro-électriques actionnées par ces chutes sont ordinairement moins coûteuses d'établissement, surtout quand

elles n'exigent pas de canalisations de trop grande longueur. Les usines, créées au début dans les vallées supérieures des Alpes, sur les emplacements les plus avantageux, ont pu aménager le cheval par 250 ou 300 francs ; depuis lors, ces prix ont monté beaucoup ; ils dépassent généralement 400 à 500 francs, et atteignent quelquefois 1.000 francs et plus. A Jonage, près de Lyon, la Société des Forces Motrices du Rhône a dépensé, dit-on, 1.800 francs par cheval. Ce sont des prix d'avant guerre.

Le Rhin, sur lequel on projette d'établir de puissantes usines, est aussi alimenté surtout par la houille blanche, car son régime est glaciaire : les stations de Kembs et Neuf-Brisach seront aménagées pour 90.000 chevaux en régime moyen et portées plus tard à 270.000 chevaux. Le devis d'une première installation mettait le cheval à 770 francs, mais ce prix sera diminué par l'exécution du projet complet¹.

Les stations de montagne souffrent de grandes variations de débit, qu'on atténue par la création de réservoirs d'emmagasinement, jouant le rôle de régulateurs, à l'instar de ce qu'est le lac Léman pour le Rhône et le lac de Constance pour le Rhin. On recourt aussi, comme cela a été fait à Thonon, à des bassins auxiliaires sur-

1. Ces questions sont traitées dans la conférence de M. Lévy-Salvador, sur *Le Rôle de l'utilisation des chutes d'eau dans l'extension de l'activité industrielle et agricole* ; Paris, Dunod et Pinat, 1919.

élevés dans lesquelles on remonte de l'eau mécaniquement aux heures de moindre demande ; on utilise ensuite ces réserves aux heures de pointe.

Les bassins de la Loire, de la Seine, de la Manche et les bassins secondaires du versant de la Méditerranée et de l'Atlantique utilisent l'énergie de la houille verte : ces stations de plaine développent leur puissance maximum aux mois d'hiver. Leur régime est plus régulier. Les turbines fonctionnent sur chutes moyennes et basses ; elles sont souvent installées sur un barrage fermant les points étroits des gorges des cours d'eau à lit très encaissé : c'est fréquemment le cas des rivières qui découlent du Massif Central. Ces barrages constituent aisément en amont des réserves régulatrices de grande capacité. Le prix de revient du cheval-usine ne s'abaisse guère au-dessous de 800 francs¹ ; on ne se trompera pas de beaucoup en le cotant au double des hautes chutes ; l'avenir appartient donc plutôt à ces dernières.

La puissance totale aménagée dans nos stations hydrauliques était de 115.000 chevaux, vers la fin du XIX^e siècle ; lors du Congrès tenu à Grenoble, en 1902, on l'estimait à 200.000 ; à la veille de la guerre, elle était de 750.000 chevaux,

1. Ce sont toujours des prix d'avant guerre ; ils sont majorés aujourd'hui dans une proportion effrayante et échappent à toute estimation en ce moment.

encore inférieure au dixième de la puissance disponible. Cette proportion restait faible. La Suisse avait alors 480.000 chevaux sur 3 millions, soit 16 % : elle nous avait dépassés en initiative, mais elle était poussée par la nécessité, car elle manque entièrement de houille noire.

Lorsque la guerre éclata, notre industrie était en voie de regagner le chemin perdu : beaucoup d'installations nouvelles étaient projetées, quelques-unes avaient été commencées. La mobilisation arrêta les travaux, mais ils furent repris en 1915, et poussés avec vigueur, pour satisfaire aux besoins de nos usines de guerre, qui fournissaient à nos armées les canons, les obus, la poudre, les explosifs et les autres produits chimiques. Il fallut aplanir d'innombrables difficultés matérielles, financières et même légales : on trouva le moyen de les surmonter. Déjà en 1916, la puissance hydraulique française aménagée, en tenant compte des petites usines¹ disséminées sur les cours d'eau du domaine public et sur toutes les rivières non navigables, ni flottables, s'élevait à 1.456.000 chevaux ; en 1921, elle ne sera pas loin de 2 millions et demi de chevaux.

Le patrimoine national, constitué par nos

1. Les statistiques officielles ne tiennent pas compte des établissements d'une puissance inférieure à 500 chevaux : elles sont donc incomplètes. Voir sur cet intéressant sujet la conférence de M. le commandant Cahen, que je trouve reproduite dans la *Revue générale d'Electricité*, 14 septembre 1918.

richesses hydrauliques, n'est donc pas méconnu par nous : il est en voie de réalisation. On a déjà fait beaucoup ; l'effort de la guerre sera poursuivi. Il ne s'agit pas seulement de multiplier et d'aménager plus complètement nos établissements, il faut le faire plus rationnellement. Que l'on se préoccupe davantage de capter les moindres chutes, et que l'on emprunte aux Américains, nos maîtres en initiative, ces usines automatiques, dont la mise en marche et l'arrêt s'opèrent sans intervention directe tout en se contrôlant de loin, et qui se raccordent ainsi aux réseaux, auxquelles elles apportent leur contribution au moment des surcharges. Toutes ces sources d'énergie, petites et grandes, seront incorporées dans un vaste réseau national, rigoureusement unifié ; l'association des stations de montagne et de plaine, dont le maximum présente un décalage de six mois, régularisera la production et réduira l'importance du concours qu'il faut demander aux stations thermiques, consommatrices de houille noire ; on obtiendra un synchronisme de plus en plus grand entre les besoins de puissance et les disponibilités ; grâce à la diversité de la clientèle desservie, on atteindra un taux de plus en plus élevé du facteur de charge. Utilisation plus entière de nos ressources, augmentation de la sécurité des services, diminution des frais de fonctionnement, réduction du capital investi dans les machines de réserve, etc., voilà une partie des avantages à

recueillir : je me borne à les indiquer dans ce travail spécialement consacré à l'économie réalisable dans l'emploi de la houille noire.

Quelle sera cette économie ?

Je m'engage ici sur un terrain dangereux ; il ne faut pas s'y aventurer à la légère et il convient de se garder de toute évaluation imprudente, pouvant conduire à des illusions et à des déceptions.

Les deux millions et demi de chevaux, dont on peut prévoir un prochain aménagement, ne travailleront pas 24 heures par jour, mais il est permis de compter sur un facteur de charge d'au moins 50 %, soit sur 12 heures d'action pendant 365 jours : sur cette base, nous arrivons à $2.500.000 \times 12 \times 365 = 10.950 \times 10^6$, c'est-à-dire à près de 11 milliards de chevaux-heure par an. En supposant que cette puissance permit de mettre à l'arrêt des machines à vapeur, consommant 1,5 kgr. de charbon par cheval-heure effectif, développant une puissance équivalente, nous réaliserions une économie de plus de 16 millions de tonnes de houille noire, sur les 65 millions que nous consommions avant la guerre.

Ce chiffre ne constitue qu'une approximation, mais elle est suggestive, et nous concluons, avec M. Cahen, en disant que « rien ne peut être plus important pour le développement économique de notre pays que l'aménagement de ses puissances hydrauliques, afin de pouvoir opposer

« aux grandes richesses en charbon du sous-sol
« de l'Allemagne les magnifiques richesses des
« vallées de France ».

Le rayon d'action des usines hydro-électriques peut s'étendre loin des chutes des Alpes, des Pyrénées et du Massif Central, mais son développement deviendra onéreux au nord d'une ligne partant de la Rochelle et aboutissant à Strasbourg : c'est dans ces régions que devra être utilisée la houille bleue. La mise en œuvre de l'énergie produite par les marées mettra ainsi au service de notre industrie une nouvelle et considérable source de puissance motrice, située providentiellement au périmètre des zones que la puissance des chutes ne peut plus atteindre aisément.

Nous sommes favorisés en France par le grand développement de nos côtes sur l'Atlantique et la Manche et par l'amplitude de nos marées, qui n'est guère égalée ou dépassée qu'en quelques rares points de l'Angleterre et du Canada : l'utilisation des mouvements de la mer atteint par suite chez nous une importance qu'elle ne possède dans aucun autre pays : nous avons en effet plus de 1.500 kilomètres de côtes, et nos marées ont une grandeur qui met en jeu une puissance considérable. A Saint-Malo, la différence maximum de niveau des eaux atteint 13 m. 60 et elle ne descend pas au-dessous de 3 mètres en période de morte eau. C'est, il faut le dire, le point le plus favorisé

de nos plages, mais à Boulogne le maximum est encore de 9 m. 25 et à Dunkerque de 5 m. 75.

Cette situation privilégiée de notre pays avait été comprise depuis longtemps et le premier brevet que Bélidor prit au XVIII^e siècle a été suivi d'une multitude d'autres, dans l'étude desquels je n'entrerai pas, me contentant de faire voir où en est la question à l'heure présente.

Je rappellerai d'abord qu'il existe en Amérique sur les côtes de la Nouvelle-Angleterre des moulins à marée, qui fonctionnent depuis des années et fournissent le travail à peu près pour rien ; la chose est assez rare, pour que nous nous y arrêtions. Décrivons l'usine de Mamaroneck, installée sur un bassin, qui ne mesure malheureusement que 11 hectares, en un point où la différence de niveau des marées n'est que de 2 m. 10. A l'origine, la station comportait des roues en dessous, placées à la suite l'une de l'autre, au nombre de deux ; il y a une cinquantaine d'années les vieilles roues, fatiguées et jugées trop encombrantes, furent remplacées par des turbines. Trois portes sont établies sur la retenue ; leur fonctionnement automatique laisse entrer l'eau, quand la mer est haute, la retiennent ensuite et la dirigent à mer basse dans le bief des machines. La chute est variable, ce qui est un inconvénient ; d'autre part, on ne peut travailler que six heures et demie sur douze¹.

1. Mémoires de la Société des Ingénieurs Civils, 1912, tome II, page 334.

En 1890, M. Decœur a indiqué le moyen de corriger ces deux défauts ; il divise le bassin en deux compartiments séparés par un barrage, dans lequel sont logées les turbines. Un des compartiments est toujours maintenu aussi plein que possible, et l'autre est au niveau le plus bas ; l'eau tombe de l'un dans l'autre. Dans le premier, le niveau ne baisse que du tiers de la marée, alors que dans le second le niveau ne doit pas s'élever de plus du tiers au-dessus de la basse mer. La chute varie donc de 53 à 80 % de la hauteur de la marée. Le système Decœur se prête bien à une marche continue, mais il fournit moins de travail.

Parmi les brevets français, je signalerai encore celui de M. Singrün, le distingué constructeur de turbines d'Épinal, qui avait imaginé, en 1899, un ingénieux système d'utilisation du flux et du jusant, consistant dans le barrage d'un estuaire et l'emploi de vannes conjuguées ; l'inventeur procurait de la sorte un mouvement continu et de même sens des turbines¹. C'est la voie du succès : la constance et la continuité de la puissance sont des éléments essentiels dans l'espèce.

M. Maynard, après avoir décrit des projets d'aménagement des baies de Rothéneuf, de la Rochelle, d'Arcachon et de la Rance maritime,

1. Voir la remarquable étude, publiée en 1918 par la *Revue générale d'Electricité*, de M. Maynard, ingénieur des Ponts et Chaussées, et celle de M. Guédard (*Id.*, mars 1919).

conclut en déclarant que le captage de la puissance des marées « peut se faire dans des conditions en général plus avantageuses que pour les hautes chutes de montagne » ; ses arguments paraissent décisifs. Il s'agit d'ailleurs de puissances considérables. Je ne citerai pour exemple que le projet de la Rance, capable de développer 102.000 chevaux ; les frais d'établissement ne dépasseraient pas 210 francs par cheval, et le prix de revient du cheval-heure pourrait être estimé à moins de 3 dixièmes de centime. M. Decœur avait prévu sur la rive gauche de la Seine un barrage de 10.000 hectares de superficie ; la hauteur des marées étant, en ce point, de 3 à 8 mètres, la puissance disponible passait de 3.000 chevaux en morte eau à 9.000 en vive eau. De son côté, M. Guédard, attaché au Service des Forces hydrauliques de la Cie Générale d'Electricité, écrit que « le pays ne saurait laisser plus « longtemps inutilisée la puissance considérable « dont il dispose sur ses côtes, et qu'il lui est « possible de recueillir, pour le plus grand profit de son expansion économique, en disciplinant ses marées ».

L'énergie solaire tient à notre disposition d'autres adjuvants. La force vive du vent est employée de temps immémorial pour propulser les navires et pour faire tourner des moulins. Elle fournirait davantage si elle était moins intermittente et plus constante.

Un vent, dont la vitesse est inférieure à 4 mètres par seconde, n'est pas suffisant pour faire tourner convenablement un moulin ; par contre, une vitesse de 8 mètres oblige de rentrer de la toile ou d'amener les surfaces à s'effacer. Or, on ne peut guère compter chez nous que sur 150 jours remplissant les conditions favorables d'utilisation. Pour éviter les longs chômages, on est donc conduit à installer des ailes ou des roues de très grand diamètre. D'autre part, la puissance à recueillir est assez faible : pour une vitesse du vent de 7 mètres, il faut offrir au vent une surface de 50 mètres carrés pour obtenir environ 7 chevaux : c'est peu.

Une autre difficulté réside dans le changement d'allure du travail ; il varie proportionnellement au nombre de tours, à moins qu'on ne fasse varier convenablement les résistances utiles à vaincre, ce qui se fait rarement. Il en résulte un faible rendement : ainsi, dans le cas de l'actionnement d'une pompe, le travail en eau montée ne représente, même dans les cas favorables, que le quart de la puissance disponible, parce que la course de la pompe reste constante. Il faudrait pouvoir modifier la liaison entre le piston et l'arbre ; mais on juge la complication trop grande.

Quoi qu'il en soit, la puissance du vent est un auxiliaire dont nous avons oublié de nous servir en France. Il y avait autrefois, dans les environs de Lille, des centaines de moulins à pilons

d'huile sur lesquels Coulomb avait fait ses expériences classiques, et qui n'existent plus que dans les souvenirs des populations et sur les tableaux des vieux maîtres flamands. Les Hollandais se sont montrés mieux avisés que nous, et ils ont employé les moulins à vent à l'assèchement des polders, voire même à la commande de certaines usines. Mais les Américains ont fait mieux encore, en perfectionnant la construction de ces appareils, qu'ils appliquent aux services les plus divers : ils ont toujours plus d'initiative que nous.

Le vent pourrait donc contribuer, dans une certaine mesure, à l'économie du combustible qui s'impose à nous aujourd'hui.

L'énergie solaire peut se capter plus directement, je ne dis pas plus simplement, ni mieux.

Les plantes vertes en fixent une certaine partie, que la combustion nous permet de transformer en calories et en kilogrammètres : malheureusement les végétaux n'en retiennent que 2 % et ne mettent, de ces misérables 2 %, qu'une minime fraction à notre disposition.

La quantité d'énergie solaire qui tombe sur la surface de la Terre est représentée par des chiffres énormes, qui déroutent l'esprit : nous en donnerons une idée en calculant le nombre de calories que déversent, en un jour, les rayons du Soleil sur les déserts d'Afrique, dont nous estimerons grossièrement la superficie à 7 millions

de kilomètres carrés. Le total de ces calories équivaut à la valeur thermique de 19 milliards de tonnes de charbon. C'est par jour 19 fois l'extraction annuelle de toutes les mines de houille du monde : or, cette radiation brûle et stérilise le sol, n'échauffe que du sable, et retourne à l'espace par le rayonnement nocturne, sans utilité pour l'homme, qui devra pourtant un jour chercher à cueillir cette énergie au passage, lorsque ses mines épuisées lui auront livré leur dernière gaillette de charbon. En attendant, l'on a fait quelques timides tentatives de recette.

Des miroirs peuvent concentrer les rayons en un foyer, occupé par une chaudière, dont l'eau se vaporisera : tel était l'appareil de M. Mouchot. Son *générateur solaire* a été exposé à Paris, en 1878; il alimentait de vapeur une petite machine qui actionnait une presse sur laquelle s'imprimait le *Soleil-Journal*. Le miroir mesurait 20 mètres carrés de surface et la machine développait, par les beaux jours d'été, une puissance d'un demi-cheval. Mais ce n'est pas à Paris que l'on peut espérer un succès pour ce genre d'appareils; M. Mouchot s'associa M. Abel Pifre et l'on fit des essais en Algérie, en Egypte, au Pérou : le silence que l'on a gardé sur les résultats obtenus n'était pas encourageant, et pourtant il y aurait lieu de ne pas renoncer à tirer quelque parti du procédé, qui pourrait être mis au point.

Toutefois on s'engagera vraisemblablement dans une voie différente pour fixer l'énergie solaire. « Quand je cherche à me figurer par quels procédés on utilisera directement les rayons, l'idée d'un appareil photo-électrique se présente à mon esprit », a dit Ostwald, et nous sommes de son avis. M. Clamician, professeur à l'Université de Bologne, met plus de confiance dans la photo-chimie, et nous lui empruntons la description imagée d'un des champs d'énergie de l'avenir¹. « Sur le sol aride, écrit-il, surgiront des colonies industrielles sans fumées et sans cheminées ; des forêts de tubes de verre et des serres de toute dimension (*camere de vitro*) s'élèveront vers le Soleil ; et c'est dans ces appareils transparents que s'accompliront ces processus photo-chimiques dont jusqu'à présent les plantes seules possédaient le secret et le privilège, mais que l'industrie humaine aura su leur ravir : l'industrie fera fructifier ces processus bien autrement que la nature, parce que la nature n'a pas de hâte, tandis que l'humanité est pressée. Et s'il advient un moment où, dans un lointain avenir, le charbon fossile soit totalement épuisé, ce ne sera pas une raison pour que la civilisation prenne fin : comme la vie, elle durera aussi longtemps que le Soleil resplendira. » M. Clamician fait état principalement d'appareils endo-

1. CLAMICIAN : *La foto chimica del avvenire* ; Scientia, vol. XII, 1912 ; page 362.

énergétiques de toute espèce, catalyseurs, sensibilisateurs, etc., produisant surtout des synthèses, des oxydations et des polymérisations ; soit par exemple la transformation d'un mélange de vapeur d'eau et d'anhydride carbonique en oxygène et méthane.

Tout cela paraîtra à quelques-uns une page de roman ; mais nous répéterons avec Montaigne que « l'homme est un grand ouvrier de miracles ».

Rappelons enfin que la chaleur interne de notre globe est aussi utilisable. La Terre possède encore une partie de son énergie originelle sous la forme calorifique : à cet égard, les espérances sont moins chimériques, car on peut, en pénétrant à une profondeur suffisante dans le sol, atteindre des couches restées à une température élevée et réaliser des coefficients d'utilisation remarquables pour une énergie qu'il n'y a qu'à prendre. Sans vouloir faire le prophète (c'est un rôle dangereux), on peut prévoir qu'un jour on pratiquera d'audacieux sondages, pour aller chercher, dans les profondeurs, de la chaleur, tout comme on y cherche du pétrole et du charbon : on fournira ainsi d'inépuisables thermostats à des moteurs thermiques et à des appareils thermo-électriques, qu'il n'est pas besoin d'inventer et qu'on n'aura que le souci d'installer. Le sondage de Parnschowitz, en Silésie, qui atteint 2.000 mètres, a fait constater une température constante de 75 degrés centigrades :

il serait aisé de descendre plus bas par des forages.

Avant d'en venir là, on continuera de faire alimenter de petites machines à vapeur, comme cela se fait à Chaudes-Aygues en Auvergne.

Les suffioni de Toscane et de la province de Pise seront utilisés plus grandement. La Société de Lardarello avait essayé; vers 1910, de faire mouvoir au moyen des vapeurs s'échappant du sol, des groupes électrogènes, mais les impuretés dont les vapeurs étaient souillées et surtout les produits acides qui les accompagnaient, exercèrent une action corrosive sur les organes des turbines, qui imposèrent une solution moins directe. On se servit des vapeurs naturelles pour chauffer des évaporateurs Kestner, qui fournirent de la vapeur pure à trois turbines de 5.000 chevaux: depuis 1914, 16 unités d'évaporation ont été montées, produisant ensemble 80.000 kilos de vapeur.

*
* *

Les succédanés et les adjuvants de la houille noire, dont nous venons d'exposer les propriétés et d'étudier les applications, contribueront à conjurer les effets de la crise redoutable que nous traversons. L'aide qu'ils nous apporteront sera immédiate pour quelques-uns, à plus longue échéance pour d'autres, utile en toute occurrence.

Il faut que nous tous, ingénieurs, constructeurs, financiers et industriels de toute importance, luttions d'initiative, d'activité et d'énergie pour mettre en valeur ces auxiliaires le plus rapidement et le plus complètement qu'il se peut faire.

III

LA MEILLEURE UTILISATION DES COMBUSTIBLES

Le rendement thermique d'un foyer dépend des facteurs multiples qui interviennent dans le développement, l'entretien et le gouvernement des phénomènes de combustion, facteurs conscients ou automatiques, dont l'action est plus ou moins sûre et soutenue et qui exigent toujours une direction et une surveillance. En tout état de choses, un des facteurs principaux est toujours l'habileté professionnelle et l'activité de celui qui conduit le feu; j'ai déjà fait ressortir l'importance de son rôle et nous avons vu que le chauffeur peut contribuer à réaliser une grande réduction sur les pertes évitables dans un foyer déterminé, et faire gagner sur l'ensemble des foyers du pays quelques millions de tonnes annuellement. Nous n'exagérons donc rien en déclarant qu'il est peu de corporations d'ouvriers dont l'intelligence et le zèle fassent prime au même degré. Il faut voir de près, pour les apprécier, ces rudes hommes, les premiers au travail et les derniers au repos, infatigables, constamment debout et en mouvement, l'esprit toujours en éveil, l'œil toujours ouvert pour suivre la marche des feux, les manipuler, observer les

indications des appareils, réaliser les meilleures conditions de la combustion et se tenir à la hauteur des responsabilités que peut leur faire encourir un moment de lassitude ou un instant d'oubli. On a dit que c'est un ouvrier d'art¹, ce qui dépasse un peu la note, mais on n'exagère pas en déclarant que c'est un artiste en son genre, une sorte d'ingénieur de sous-ordre et qu'il doit devenir un des principaux hommes de confiance du chef d'industrie. Il peut contribuer grandement et dès maintenant à atténuer la crise de combustible que nous traversons : c'est pour cela que j'insisterai sur cette question d'ordre plus professionnel que technique.

Notre Société Industrielle du Nord de la France a institué des concours annuels de chauffeurs auxquels prennent part de 15 à 20 concurrents; ce sont évidemment des ouvriers de choix; et pourtant nous constatons entre eux des écarts de 15 %.

A Liège, on organisa en 1905 un grand concours, qui mit aux prises 83 compétiteurs aux prix qui avaient été proposés. Les écarts de rendement atteignirent 30 % du premier au dernier, ainsi qu'il ressort du tableau ci-dessous :

	Vapeur produite par kilo de charbon	Rendement de la chaudière
1 ^{er} du Concours	8 k. 502	70,79 %
5 ^e —	7,344	62,43
83 ^e —	5,925	49,48

1. L. BERGER : *Le gaspillage des combustibles*. Paris, Dunod et Pinat, 2^e édition (1919), page 68.

Les 30 meilleurs d'entre eux furent de nouveau invités à une deuxième épreuve, dans laquelle un même charbon leur était fourni, mais sous des formes différentes de grains, de braisettes ou de fines; le rendement individuel varia, selon les catégories, entre 16 et 33 %; ce fut la braisette 10/20 à 15/30 qui donna le meilleur résultat.

Les Ecoles de chauffeurs, les conférences techniques faites à leur usage, les concours et les diplômes qui sont la consécration du succès constituent des éléments de formation et de perfectionnement qu'on devra développer partout, à l'exemple de ce qui s'est fait depuis longtemps dans le nord de la France, en Alsace et en Belgique. Pour tirer de ces diverses organisations tous les résultats qu'elles doivent produire, il faut d'autre part témoigner à ces modestes collaborateurs le cas que l'on fait de leurs services, en même temps que l'on stimulera leur zèle et leur bonne volonté en les intéressant aux économies réalisées par eux : cela se pratique en beaucoup d'usines, mais toutes les méthodes adoptées ne possèdent ni la même valeur, ni la même efficacité. M. Grosraud a fait observer, avec beaucoup de perspicacité¹, que certaines difficultés d'ordre pratique s'opposent à l'établissement de primes, basées entièrement sur le nombre de calories ou

1. M. GROSPAUD : Prime au personnel sur les économies de charbon dans une Centrale Electrique thermique; *Revue générale d'Electricité*, 11 janvier 1919.

de kg. de vapeur engendrés par kg. de charbon, résultats que le chauffeur ne connaîtra qu'au bout du mois et dont le contrôle lui échappe. « Il serait difficile d'obtenir un effort continu dans ces conditions. Si, au contraire, nous lui mettons sous les yeux des appareils enregistreurs (nous étudierons plus loin ces instruments), qui lui montreront qu'avec des chargements plus fréquents, dans le cas de foyers ordinaires, ou qu'en modifiant la vitesse de la grille et l'épaisseur de la couche de charbon, dans le cas de grilles mécaniques, il obtient une meilleure combustion, qui, pour lui, parce qu'on le lui aura dit, se traduira par le déplacement d'une aiguille d'enregistreur dans un certain sens, il travaillera à chercher le *maximum d'effet*, tout en produisant le *minimum d'effort*. S'il a, en outre, sous les yeux un tableau lui donnant le montant de sa prime, en fonction de l'indication de ces appareils de mesure, il travaillera avec confiance et l'on en obtiendra le maximum, si les primes ont été judicieusement établies. » Il faut se rallier sans réserve à ces considérations, qui témoignent d'une parfaite connaissance de ce qui se passe, non seulement dans les chaufferies, mais encore dans l'esprit des chauffeurs.

La technique du foyer a été parfaitement exposée dans de petits ouvrages spéciaux, parmi lesquels je dois citer un opuscule dont j'ai fait mon profit au début de ma carrière d'ingénieur, mais que je crois peu connu en France ; c'est le

Catéchisme des Chauffeurs, dont la seconde édition, que j'ai sous les yeux en écrivant ces lignes, a été publiée, en 1873, chez Desoer à Liège. Par demandes et réponses, il expose simplement toutes les circonstances de la marche d'un feu et les prescriptions qu'elle impose : on a certainement composé depuis lors des livres plus complets, mais on aura de la peine à être plus clair et plus précis.

Il a été question ci-dessus d'appareils de contrôle et d'enregistrement : sur ce point, nous avons à formuler d'importantes observations, qui s'adressent à tous les chefs d'industrie, petits et grands, désireux de se rendre compte par eux-mêmes des conditions dans lesquelles est utilisé chez eux ce combustible, acheté à grand prix et si difficilement obtenu. Les chaufferies sont généralement insuffisamment munies de ce qui est, à cet égard, strictement nécessaire. Le plus souvent, en effet, le chauffeur n'a sous les yeux qu'un seul instrument qui puisse le guider, en le renseignant sur l'allure de son feu ; c'est un manomètre. C'est lui qu'il interroge pour régler la combustion. Si l'aiguille descend, il pousse le feu ; vient-elle à monter, il ralentit son travail, abaisse le registre et profite de l'occasion pour alimenter d'eau le générateur de vapeur ; en dehors de ces alternatives, il opère au jugé, uniformisant l'épaisseur de la couche de combustible, bouchant les trous, s'il en voit, soulevant à l'aide du crochet la galette de scories, qui

a pu se former, la brisant pour donner de l'air, et procédant au décrassage, quand le moment en est venu, en travaillant pour le mieux. Ce n'est pas en s'y prenant ainsi que l'on obtient d'un charbon donné le maximum de calories qu'il peut fournir : il s'agit d'agir plus scientifiquement, et cela se peut, sans recourir aux savantes et minutieuses observations et analyses, pratiquées dans les grandes centrales.

Les coûteuses installations de laboratoire de ces établissements, obligés pour vivre de tirer la quintessence des choses, ne sont pas à la portée de tous les industriels et nous ne leur conseillons pas d'en pourvoir leurs salles de chauffe : mais nous leur demanderons de se procurer trois instruments, dont l'achat ne les ruinera pas, et dont la valeur sera récupérée, d'ailleurs, en quelques mois, par le bénéfice réalisé sur le charbon. Ces trois indicateurs sont : un pyromètre, un déprimomètre et un doseur d'anhydride carbonique, de CO^2 . Le premier fera connaître la température des gaz brûlés au sortir des carneaux, à l'entrée de la cheminée ; le second donnera la dépression, en millimètres d'eau, existant derrière l'autel, qui barre le fond de la grille ; le troisième marquera la teneur des gaz en CO^2 . Les chiffres qu'on lira sur ces appareils varieront avec la forme, la nature et la qualité du charbon, et avec la perfection plus ou moins grande de l'installation, et leur valeur absolue peut donner lieu à discussion ; mais leur valeur relative constitue un

critérium de la marche d'un feu et par suite du travail du chauffeur. La température des gaz ne doit, en général, pas dépasser 250°, dans une chaudière sans réchauffeur d'eau ou d'air, 150° quand ces appareils existent; la dépression derrière l'autel sera moyennement de 6 mm. après chargement du foyer; la teneur en CO^2 se tiendra aux alentours de 12 % au même moment. La température des gaz vient-elle à dépasser celle qui a été dite, nous jetons des calories inutilisées dans l'atmosphère. Si la dépression est inférieure à 6 mm. le tirage devient insuffisant, alors qu'il tendra à être excessif si les 6 mm. sont fort dépassés: dans le premier cas, on risque de produire de l'oxyde de carbone, avec combustion incomplète; dans le second, la vitesse de l'air est trop grande, et le contact du comburant avec le combustible est trop court, en même temps qu'on donne trop d'air. C'est enfin un excès d'air qui correspond souvent encore à une teneur en CO^2 inférieure à 12 %. Nos chiffres sont évidemment des chiffres moyens.

Les observations faites sur nos trois indicateurs sont plus ou moins liées entre elles, et elles se complètent l'une l'autre; leurs écarts de la moyenne sont symptomatiques d'une perte qu'il faut restreindre le plus possible. Elles constituent par suite la base d'une règle de conduite pour le chauffeur. Lorsqu'il note une dépression trop forte, une température trop élevée au pyromètre, une teneur trop faible en CO^2

c'est que son registre est trop ouvert, que le feu est trop mince ou bien qu'il s'est formé des trous dans le feu, ou encore que l'on y a jeté de trop grosses gaillettes. Après un chargement, la résistance au passage de l'air s'est accrue, et le feu demande plus d'air, par conséquent une plus grande ouverture du registre, en se gardant toutefois de faire baisser la température marquée par le pyromètre et en prenant soin de diminuer progressivement la dépression. A un moment donné de la journée, la pression de la vapeur devient difficile à tenir, la teneur en CO^2 tend à augmenter, et elle oblige d'ouvrir le registre ; un coup d'œil rapide jeté sur le feu montre que l'épaisseur de la couche de charbon est alors devenue trop grande : l'heure du décrassage est arrivée.

Ces considérations sommaires, que je ne veux pas prolonger, car je n'écris pas ici un Manuel du chauffeur, suffisent à la démonstration que je me proposais de faire de l'utilité de nos trois appareils adjoints au manomètre. Des enregistreurs conduiraient à des résultats meilleurs encore par l'inscription des données successives : les diagrammes relevés montrent les phénomènes dans leur continuité et facilitent leur interprétation, tout en fournissant la preuve matérielle des divers incidents du travail. Par exemple, un déprimomètre enregistreur marque chaque chargement effectué, registre fermé ainsi que c'est prescrit, par un trait vertical très net, et il

contrôle par suite le nombre et l'espacement des chargements; le pyromètre et le manomètre décèlent toute irrégularité dans l'allure ¹. Le chef d'industrie lira donc sur ces tracés l'histoire de sa chaufferie et n'aura pas de peine à estimer les pertes qu'ont pu lui faire subir d'une part l'indolence ou l'incapacité des ouvriers, d'autre part les vices d'installation de ses générateurs de vapeur, de leurs carneaux et de leurs foyers. L'ensemble de ces pertes atteint fréquemment 30 % et les dépasse plus souvent encore : c'est ce que nous allons malheureusement constater.

*
*
*

On a publié de nombreux essais de chaudières : ils donnent les résultats d'expériences très bien préparées, particulièrement surveillées, dont les chiffres sont indiscutables; mais les données qu'elles fournissent correspondent à une sélection, attendu qu'on ne fait jamais connaître que des constatations avantageuses, et que tout essai présente toujours un caractère un peu artificiel, par suite même de la manière dont on l'a conduit, et des soins dont on l'a entouré.

1. Les traités écrits sur la matière publient des courbes d'enregistreurs très suggestives : on en trouvera notamment un grand nombre dans le livre de M. IZART : *Méthodes économiques de combustion dans les chaudières à vapeur* (Paris, Dunod et Pinat, 1911, 2^e édition); M. Schmidt, d'Amiens, a finement analysé cet excellent ouvrage et mis au point certaines de ses conclusions, peut-être trop optimistes.

Cette réserve faite, consultons les procès-verbaux de ces opérations.

Je n'en reproduirai qu'un, signé de MM. Kennedy, Unwin et Capper, ingénieurs anglais réputés, effectué sur une chaudière multitubulaire de 60,29 m² de surface de chauffe, sans réchauffeur d'eau; j'extrais quelques chiffres seulement du rapport officiel :

Durée de l'essai.....	7 h. 40 m.	
Rapport : $\frac{\text{Surface de chauffe}}{\text{Surface de grille}}$	34,7	
Tirage à la cheminée	5 mm. d'eau	
Pouvoir calorifique du charbon brut.....	7.698 calories	
Volume d'air de combustion par kg. de charbon.	17 m ³	
Analyse de la fumée.....	{ CO ² 8,95 CO 0	
Température de la fumée au registre.....	261°	
Pression de la vapeur.....	11 k. 23	
Entraînement d'eau.....	0,150/0	
Eau vaporisée par m ² de surface de chauffe-heure.....	16 l. 61	
Température de l'eau d'alimentation.....	16°	
Vapeur engendrée par kg. de charbon brut.	8 k. 69	
Calories utilisées par kg. de charbon brut..	5.629	
Bilan de la chaudière	Rendement thermique	73,11
	Perte par les gaz brûlés. ...	17,36
	» par les escarbilles.....	0,98
	» par combustion imparfaite.....	1,33
	» par rayonnement, etc....	7,22
		<hr/> 100,00

Voilà une chaudière, d'un type réputé, parfaitement installée, prise dans de bonnes conditions, alimentée de charbon de qualité conduite sous l'œil de maîtres en la matière, réalisant une combustion qu'on ne peut critiquer (tous les

chiffres relevés en témoignent), qui ne rend que 73,11%. J'avais signalé ces résultats dans un travail de comparaison, publié en 1902¹, dans lequel je n'avais pu citer de meilleur qu'un rendement de 78,85, rendu douteux par l'absence de mesure des entraînements d'eau ; j'avais conclu en déclarant qu'un rendement de 73% constituait une brillante moyenne, difficile à dépasser. J'aurais dû ajouter qu'elle est rarement atteinte ; dans la généralité des cas rencontrés dans l'industrie, on obtient, en effet, beaucoup moins. En voici une preuve indiscutable, entre un grand nombre d'autres, que le manque d'espace ne me permet pas de consigner dans cette étude. L'Association Alsacienne des propriétaires d'appareils à vapeur, qui contrôlait, en 1912, 4.216 chaudières, avait effectué au cours de l'exercice courant 84 essais de vaporisation, et elle en fit connaître les résultats dans son rapport annuel² ; or, cinq générateurs seulement donnèrent un rendement supérieur à 73%, 38 fournirent un rendement compris entre 65 et 73% ; pour 41, par conséquent, l'utilisation était inférieure à 65%.

Mais je me hâte d'ajouter qu'un certain nombre de générateurs étaient pourvus de réchauffeurs d'eau et de surchauffeurs de vapeur, qui

1. A. WITZ : Rendement comparé des machines à vapeur et des moteurs à gaz ; *Eclairage Electrique*, 4 et 11 janvier 1902.

2. Edition française du *Bulletin annuel*, page 38 ; en réalité, l'Association avait procédé à 110 expériences de vaporisation, mais on n'a retenu que les essais complets.

MUSÉE COMMERCIAL
SECRETARIAT

formaient avec la chaudière proprement dite un ensemble de valeur supérieure : les chiffres en témoignent. Le relevé porte 37 installations de rendement plus élevé que 73, et 24 dont le rendement se tenait entre 65 et 73 %; notons à l'honneur de nos industriels et ingénieurs alsaciens cinq rendements extrêmement intéressants de 81; 83,3; 85,7 et 85,9 et enfin un autre de 88,4 %, ce dernier obtenu avec de la braisette 8/15 de la Ruhr, ayant un pouvoir de 7.311 calories¹. Dans le commentaire hautement autorisé dont M. Kammerer, ingénieur en chef de l'Association, a accompagné le tableau comparatif de ces résultats, les faibles rendements sont attribués le plus fréquemment à un excès d'air, plus rarement à une combustion incomplète par manque de tirage, et sept fois à un manque de soins dans la chauffe.

La place me manque pour déduire de cette remarquable étude tous les enseignements qu'elle comporte; je me contenterai de dire qu'une surveillance des services, jointe à une application rationnelle des règles fondamentales de l'art, conduirait souvent les industriels à des économies notables et que, d'autre part,

1. Ce rendement tomba à 84,2 avec des menus 0/8 de la Ruhr, de même provenance, dont le pouvoir calorifique, égal à 7.175 calories, n'était inférieur à celui de la braisette que de 1,9%: la forme et l'état physique influaient donc sensiblement sur l'utilisation avec le chargeur mécanique desservant le foyer, ainsi que cela se constate du reste toujours avec des chauffeurs et avec n'importe quels appareils.

l'emploi des surchauffeurs et des réchauffeurs s'impose dans tous les cas où il est possible. J'ajouterai que pas n'est besoin d'être un grand industriel, disposant d'une imposante batterie, pour obtenir les grands rendements, attendu que l'installation qui figure dans le palmarès de M. Kammerer comme brillante première avec 88,4 d'utilisation, se compose d'une chaudière de 230 m² de surface de chauffe, d'un surchauffeur de 55 et d'un réchauffeur-économiseur de 384 m². Les immenses chaudières des super-centrales américaines, qui vaporisent près de 50.000 kg. d'eau à l'heure, par un foyer unique, ne rendent pas 88, et M. Sosnowski ne leur attribue que 83, dans le rapport documenté qu'il a présenté à la Société des Ingénieurs Civils de France, en mai 1916. Et pourtant cet ingénieur distingué a-t-il fait ressortir les soins pris par ses collègues d'outre-Atlantique pour supprimer ou du moins réduire au minimum toutes les causes de pertes dans les chaudières. Ainsi il a signalé la pratique très recommandable des revêtements métalliques étanches des massifs de maçonnerie, pour parer aux rentrées d'air si pernicieuses, et l'emploi des hautes pressions, de 30 à 40 kg., qui diminuent l'encombrement et le prix d'établissement des installations. Nous n'en sommes pas encore là en Europe.

Ce qu'on préconise surtout chez nous, non sans raison, du reste, ce sont des appareils qui assurent la meilleure combustion avec le

minimum d'effort intellectuel et manuel du chauffeur ; ils sont nombreux et quelques-uns d'entre eux sont extrêmement ingénieux et réellement très efficaces ; leurs noms et leurs titres se lisent en grandes lettres dans les pages de couleur que nos plus importantes Revues consacrent aux annonces et qui leur permettent de vivre, malgré la cherté du papier ; leurs mérites et les économies qu'ils peuvent procurer y sont énumérés avec complaisance et sans fausse modestie. Les industriels, qui font aux ingénieurs-conseils l'honneur et la grâce de les consulter, leur demandent fréquemment quel est le plus parfait de ces auxiliaires des chaufferies : question souvent embarrassante et toujours délicate, à laquelle on ne répond qu'en invoquant de la part de son confident le secret professionnel. Dans un article destiné à l'impression, il ne peut être question de classer des inventions selon le mérite qu'on leur attribue ; ce serait imprudent, voire même dangereux ; c'est du reste impossible, car l'expérience qu'on a pu acquérir est toujours courte d'un côté ou de l'autre, et le jugement le plus indépendant se dégage difficilement de toute influence. A dire vrai, il y a autant de solutions qu'il y a d'espèces ; toute généralisation est risquée, les observations recueillies s'appliquant à des combustibles déterminés, à des installations et à des conditions particulières et en somme à des cas spéciaux.

Je me bornerai donc à une nomenclature

rapide, aussi méthodique que possible, pour en racheter la brièveté, dans laquelle je ne mentionnerai que les noms des inventeurs connus de tous, dont les créations sont spécifiques d'une catégorie déterminée d'appareils et de mécanismes.

*
* *

Il y a plus de trois quarts de siècle que les techniciens poursuivent la recherche d'appareils assurant une combustion parfaite dans les foyers industriels; d'innombrables brevets ont été pris en tous pays; moins nombreuses sont les idées émises et les dispositifs proposés, car les inventeurs tournent dans un cercle fermé et ils repassent par les mêmes lieux, quelquefois sans le voir et plus souvent sans se l'avouer, comme le peuple d'Israël dans le désert; que de prétendues nouveautés sont du vieux remis à neuf, et que de choses reviennent sur la scène sous des costumes différents! Pour s'en convaincre, il faut lire les premières éditions de Péclet, de Ser, de Rankine, de Bède, et des autres qui ont repris cet inépuisable et toujours intéressant sujet.

Passons en revue les divers genres d'appareils en usage dans l'industrie.

Les grilles. — Les formes et dispositions de grilles, devant favoriser une bonne et complète combustion, ont fait l'objet d'essais et de recherches multiples qui présentaient généralement un caractère empirique indéniable: il leur

a nuï dans l'esprit de quelques ingénieurs ; l'un d'eux a dit, dans un ouvrage très documenté et plein de judicieuses observations, dénotant une pratique avertie, que « les plus simples sont généralement les meilleures », et un autre, dans un livre estimé, que « c'est à la grille primitive de nos pères qu'on revient toujours¹ ». L'opinion de mes deux auteurs est prédominante aujourd'hui. Toutefois il faut reconnaître qu'il n'est pas indifférent d'employer une grille quelconque pour n'importe quelle houille, en gaillettes, en grains ou menus, grasse ou maigre, collante ou non, dont les cendres sont plus ou moins fusibles ; des barreaux à gorge à trous, des barreaux oscillants, etc., ont donné d'excellents états de services avec des charbons encrassants ; le barreau à lames de persiennes de Poillon a permis d'utiliser des fines très maigres en foyer soufflé. Je m'arrête : on écrirait un livre..., peu intéressant d'ailleurs, sur les variétés des formes de grilles.

Les grilles mécaniques à soulèvement ou à secousses ont eu leur heure de vogue ; les unes sollicitaient la partie inférieure de la couche de combustible à se dégager de ses cendres, les autres agissaient avec moins de douceur sur les mâchefers pour les briser. La chaîne sans fin de Juckes ou de Taillefer faisait avancer la charge vers l'autel d'un mouvement continu ; là, elle se

1. BERGER : *op. cit.*, page 31. — BELLENS : *Traité des chaudières à vapeur* (Paris, Baudry et Cie, 1895), page 431.

dérobait sous elle et la déversait dans le cendrier. Le combustible en feu traversait successivement les phases propices à sa meilleure utilisation ; mais les charnières s'encrassaient, les chaînons cassaient, et l'appareil devenait trop fumivore, car il livrait passage à un excès d'air. La grille circulaire rotative avait les mêmes qualités et plus de défauts ; l'envers de la médaille était vraiment fâcheux, mais ces idées devaient faire leur chemin. Elles ont conduit au chargement automatique.

Les foyers automatiques. — Les chargeurs mécaniques nous sont venus d'Amérique, où la main-d'œuvre est chère ; ils nous conviennent de mieux en mieux, car les salaires suivent chez nous une progression ascendante, dont on n'entrevoit pas la limite. Trois types sont en concurrence : les *sprinkler-stokers*, où des pelles mouvantes ou oscillantes, souvent des roues à ailettes, répandent le combustible sur une grille plane ; les *underfeed-stokers*, dans lesquels un poussoir quelconque ou bien une hélice sans fin amènent du combustible frais sous la couche en ignition ; et les *grilles à chaîne*, ou *grilles articulées*, que feu Taillefer s'étonnerait de ne pas entendre appeler de son nom¹. Ces trois systèmes

1. Sans vouloir rappeler à l'esprit du lecteur le *sic vos non vobis* du poète, qu'il me soit permis néanmoins de dire encore que le poussoir avait été breveté autrefois sous le nom de Duméry, et la vis sans fin sous celui de Godillot, sous lequel elle est encore désignée fréquemment.

ont une valeur réelle et des avantages particuliers, dans la discussion desquels je ne peux entrer ici : ils conduisent fréquemment à de notables augmentations de rendement, et sont donc recommandables. On peut les appliquer à des chaudières qui n'en sont point pourvues, même aux générateurs à foyers intérieurs auxquels se prêtent le mieux les appareils à pelletage; les grilles mobiles se disposent plus fréquemment sous les générateurs multitubulaires à tubes inclinés. Les premiers s'accommodent bien de toutes les espèces de houilles, pourvu qu'elles ne soient pas de dimensions trop inégales; les *underfeed* conviennent aux menus, ayant une certaine teneur en matières volatiles; cette teneur s'impose aussi aux grilles mobiles, sur lesquelles les criblés et les braisettes lavées sont de bon emploi.

Les chargeurs mécaniques tendent à se répandre, mais ils sont encore discutés. Nous savons, me dira-t-on, des industriels très éclairés qui ont démonté des appareils, parce qu'ils ne fournissaient pas les économies annoncées. L'argument est à considérer, mais il n'est nullement péremptoire. Et d'abord, il y a des vendeurs qui promettent beaucoup et des acheteurs trop confiants : ceux-ci deviennent par la suite plus exigeants et il faut le leur pardonner. Les économies sont le fait d'autres facteurs que la machine à enfourner le charbon, et l'on a souvent négligé d'en tenir compte en faisant l'installation.

D'ailleurs une augmentation de puissance ou de rendement résulte d'une meilleure combustion, laquelle a pour conséquence une température plus élevée du foyer et un rayonnement plus intense, dont les tôles peuvent souffrir, surtout si l'on alimente d'eaux incrustantes mal épurées; il en résulte des inconvénients, d'où vient souvent la désaffection et le mécontentement.

On reproche avec plus de raison peut-être à certains chargeurs d'occasionner des frais d'entretien exagérés, d'exiger une surveillance que l'on croyait inutile, d'imposer encore un chauffeur pour régler l'épaisseur des feux, la vitesse des mouvements, l'admission d'air, etc.; l'automatisme n'est en effet jamais complète, mais l'intervention du conducteur peut être bien réduite par l'emploi des dispositifs qui tendent aujourd'hui à prévaloir.

En somme, les foyers automatiques peuvent donner lieu à des critiques, qu'il était juste de faire entendre. M. Izart, qui ne s'en laisse imposer par aucune réclame, est d'avis qu'« en dépit de son principe aimable le foyer mécanique n'a pas tenu tout ce qu'il promettait », et il va jusqu'à dire que « une chaudière à la main, conduite par des chauffeurs capables, pourra donner une consommation moindre qu'une chaudière à foyer mécanique ». Mais il s'empresse d'ajouter que « les chauffeurs capables et actifs sont chose peu commune et qu'on s'exonère ainsi des difficultés sociales de plus en plus aiguës qu'occasionne la

main-d'œuvre ouvrière¹ ». Ces dernières lignes ont été écrites, en 1911, dans une troisième édition; la quatrième, loin de les démentir, les soulignera sans doute.

Résumons la discussion en disant que l'alimentation mécanique des foyers procure généralement une réelle économie quand elle est appliquée avec discernement, qu'elle conduit à une réduction de personnel dans une batterie de générateurs, et qu'elle convient donc plutôt aux installations importantes, dans lesquelles on la complète par des appareils réglant automatiquement le tirage.

Le travail nécessaire pour mouvoir les foyers mécaniques est relativement minime : une grille absorbe moyennement une puissance d'un demi-cheval.

Les tirages artificiels. — On appelle tirage naturel celui qui est produit dans les cheminées par la différence de poids existant entre deux colonnes d'air et de gaz brûlés, l'une à la température de l'atmosphère ambiante, l'autre à la température moyenne de la cheminée d'évacuation des gaz brûlés. Ce tirage, qui suffisait généralement quand on faisait usage de la houille habituellement employée dans les foyers de générateurs, cessait de l'être dans les cas d'allure vive, avec emploi de combustibles anthraciteux, ou

1. IZART, *op. cit.*, page 82.

particulièrement menus ou fort cendreux. On résolut alors le problème en soufflant les foyers, à l'instar de ce qui se faisait depuis longtemps en métallurgie.

Cette solution présentait un avantage que je dois faire ressortir. Le tirage naturel manque d'élasticité : on ne peut que le restreindre, en barrant plus ou moins le chemin aux gaz en mouvement à l'aide d'un registre ; il n'y a pas moyen de l'augmenter. De plus, pour assurer le processus rationnel d'une bonne combustion, on devait donner beaucoup d'air immédiatement après le chargement, puis diminuer son accès à mesure que la couche de combustible devient plus perméable. C'était trop demander au chauffeur, auquel on prescrivait déjà de baisser le registre à chaque ouverture des portes. Sir Prideaux imagina alors un ingénieux appareil monté sur les portes ou disposé sur le registre, dont les anciens Traités font religieusement mention ; mais le régime était encore dépourvu de souplesse, et on fut de nouveau amené à souffler sur le feu. Ce sont les origines du tirage *artificiel*, auquel conviendrait mieux le nom de tirage mécanique. Pécelet, Williams et les autres maîtres de l'époque le préconisèrent avec conviction, en déclarant et prouvant qu'il était plus économique que l'autre, bien qu'il nécessitât une dépense supplémentaire d'énergie : ils ne se trompaient pas.

Depuis lors, les applications de ce genre se

sont multipliées, et pourtant la cheminée a conservé ses partisans et l'on discute encore s'il vaut mieux de recourir au tirage artificiel qu'au naturel, et quel est le tirage artificiel le plus recommandable et le plus économique. Vaut-il mieux donner à l'air destiné à la combustion une pression capable de vaincre la résistance de la grille, du charbon et des carneaux, ou bien faut-il créer dans la chambre de combustion une dépression en suçant, comme le fait la cheminée, les gaz du foyer? Autrement dit, faut-il souffler sous grille ou aspirer dans la cheminée? Et comment souffler, comment aspirer? Les éjecteurs à vapeur ont leurs détracteurs et leurs partisans : je suis de ces derniers, car l'économie réalisée paie largement la dépense de vapeur qui est de 3 à 4 % de la production, et le jet de vapeur a la précieuse propriété de rafraîchir les barreaux, d'empêcher les mâchefers d'y adhérer, de faciliter et abrégé les décrassages, etc. Le ventilateur soufflant est préconisé par d'autres, parce qu'il permet de régler facilement le débit par un réglage de vitesse, et aussi parce qu'on remplace la monumentale et coûteuse cheminée de briques par un simple tube de tôle dépassant à peine le toit : il leur paraît préférable au ventilateur aspirant, soumis à l'action nuisible de la température des gaz, de leurs poussières et de leurs éléments corrosifs.

Louis Prat a imaginé une solution mixte en créant ce qu'il a appelé le tirage *induit*, dans

lequel un éjecteur d'air produit l'aspiration; celle-ci est indirecte, un jet d'air pur, de gaz brûlés ou encore un mélange des deux est refoulé dans une tuyère logée au pied de la cheminée. D'ingénieurs perfectionnements ont été apportés au système, surtout en diminuant les résistances que les gaz ont à surmonter, et en adaptant mieux le ventilateur à sa fonction.

Un inventeur, dont j'ignore le nom, a combiné le soufflage avec l'aspiration en imaginant le tirage *équilibré* ou *compensé*, dans lequel les deux ventilateurs sont réglés de manière à ce que la chambre de combustion soit maintenue à une pression très voisine de la pression atmosphérique, ce qui supprime tous les inconvénients résultant de l'ouverture des portes. On proportionne exactement la quantité d'air envoyée au foyer avec le poids de charbon à brûler, en maintenant une certaine dépression d'air entre le dessus et le dessous de la couche de combustible, grâce à l'action combinée du ventilateur qui souffle l'air sous la grille et de celui qui aspire les gaz vers la cheminée. Un indicateur de dépression, branché entre le dessus et le dessous de la couche de charbon, fait savoir au chauffeur, pour chaque qualité de charbon, l'allure à laquelle il doit maintenir les ventilateurs; mais on peut automatiser cette opération, ainsi que cela est réalisé dans le brevet Hotchkiss. Ce dispositif ne comporte plus qu'un seul ventilateur, un ventilateur soufflant, la cheminée remplissant l'office

de l'autre ; ce ventilateur à vitesse, donc à débit variable, est placé sous la dépendance d'un régulateur à vapeur, soumis aux changements de pression de la chaudière et gouvernant l'intensité du soufflage d'après la demande de vapeur ; on adjoint à ce régulateur un second régulateur, agissant par la pression des gaz du foyer et modifiant en conséquence l'ouverture du registre et l'appel de la cheminée.

Ces deux régulateurs coopèrent pour maintenir au-dessus de la grille une pression voisine de celle de l'atmosphère. Le tirage équilibré n'est pas uniquement un appareil de station centrale ; il s'applique avec profit même à des générateurs d'une cinquantaine de m² de surface de chauffe. Le chauffeur n'a plus autre chose à faire que de mettre du charbon sur la grille, et un chargeur mécanique peut même suppléer l'intervention de l'ouvrier : à tous égards, ce système exerce une réelle séduction.

Les réchauffeurs d'air. — La surchauffe de la vapeur et le réchauffement de l'eau d'alimentation avaient élevé le rendement des chaudières par l'utilisation plus entière du calorique des fumées ; le réchauffement de l'air comburant est venu procurer une nouvelle économie, que les théoriciens avaient annoncée, car une haute température du foyer assure une meilleure combustion et augmente les échanges de calorique entre

le gaz chauffant et l'eau à chauffer¹. En usage depuis longtemps pour les fours métallurgiques, cette pratique avait été introduite avec succès dans les chaufferies de la marine; Poillon en fit une application heureuse aux chaudières fixes, et depuis lors son exemple a été suivi. Il suffit de placer un récupérateur tubulaire à l'extrémité des carneaux, et de faire suivre un chemin inverse aux gaz chauds et à l'air introduit dans le foyer pour réaliser un chauffage *méthodique* fructueux. On l'a combiné avec les dispositifs décrits précédemment pour parfaire le rendement; l'appareil Mix, de la maison Emile Prat, est un exemple de ce que l'on fait dans cette voie, qui comporte de nombreuses solutions également recommandables de MM. Genevet et Cie, de l'Office central de Chauffage rationnelle et de bien d'autres.

Sur ce point encore, nous rencontrons des objections: les hautes températures du foyer ont pour contre-partie une usure plus rapide des grilles et des revêtements; l'emploi de matériaux de premier choix s'impose. Il faut aussi plus de soin et de surveillance de la part du personnel, qui ne peut plus pratiquer ce qu'on a appelé

1. La pratique avait du reste confirmé la théorie. Des charbons gras rendaient mal dans les chaudières à foyer intérieur, par suite des condensations produites au contact des tôles relativement froides; des voûtes réfractaires incandescentes amélioreraient la combustion. Des maigres se trouvaient bien des mêmes revêtements réfractaires dans les foyers extérieurs. Pour que les hydrocarbures distillés brûlent, il faut un foyer chaud.

spirituellement le fonctionnement de père de famille. On n'a rien sans peine.

La pulvérisation du charbon. — Ce n'est non plus une nouveauté, que cette méthode de brûler le charbon après l'avoir pulvérisé finement, et en le projetant dans le foyer par un jet d'air comprimé : un premier brevet avait été pris en 1839, par Corbin de Boissières, un autre en 1856, par Zéni, directeur des forges de Guérigny ; plus tard Resch et Crampton appliquèrent la pulvérisation au chauffage des fours à puddler rotatifs. On constata une énorme économie dépassant 50 %.

Les Anglais et les Américains s'appliquèrent à développer et améliorer le procédé ; ils avaient compris qu'il conduisait à une réalisation d'une combustion complète, réglable à volonté, comparable à la combustion d'un liquide, d'une vapeur ou d'un gaz, qu'on supprime aux temps d'arrêt ; l'opération, devenue entièrement mécanique, simplifie la manutention du combustible, supprime les dégrèvements et leur cortège d'inconvénients et de déperditions ; elle trouve son application en chaudières d'usines et de locomotives, en fours Martin et en fours à réchauffer, et même en gazogènes.

Il existe plusieurs systèmes américains de chauffage par le charbon pulvérisé (systèmes Fuller, Holbeck, aéro-pulvérisateurs), dont la Société La Combustion rationnelle a acquis la

licence en France; leur principe est le même. Le charbon, préalablement séché, est pulvérisé dans des broyeurs. Le sécheur Fuller se compose d'un cylindre en tôle, incliné sur l'horizontale, tournant sur son axe, chauffé par une double circulation de gaz amenés à une température très élevée; le pulvérisateur est à 4 boulets, qui roulent dans une gouttière circulaire, constituant un anneau de broyage. Un premier ventilateur brasse les poussières et les projette à travers un tamis; un second ventilateur aspirant et refoulant les conduit au foyer. L'aéropulvérisateur est un appareil beaucoup plus simple réunissant le broyeur et le ventilateur; il est destiné aux petites usines, donne encore de bons résultats et coûte moins cher.

Les frais de premier établissement de l'atelier de pulvérisation sont assez considérables, car le lavage, le séchage et le broyage lui-même ne laissent pas que d'exiger des installations assez compliquées: toutefois les économies obtenues permettent un amortissement assez rapide.

Toutes les houilles maigres et les anthracites, même les lignites et les tourbes peuvent être pulvérisées.

Le procédé a encore pu être appliqué à des produits très maigres dédaignés, voire même en Amérique à des crassiers de houillères, a-t-on dit; on préfère néanmoins employer des produits contenant au moins 20 % de matières volatiles et au plus 12 % de cendres. Ce qui importe le

plus, c'est la finesse et l'homogénéité des poudres; il convient que les 85 centièmes passent au tamis de 6.400 mailles au cm^2 et le reste aux 1.600 mailles¹.

Le chauffage des chaudières au charbon pulvérisé a donné des résultats extrêmement intéressants; ainsi on est arrivé à des combustions complètes, presque théoriques, marquées par une teneur dans les fumées de 1 % d'oxygène et de 17 % d'anhydride carbonique CO_2 , sans trace de CO : le rendement a dû être extrêmement élevé. Ces essais ont été faits en Amérique avec des chaudières Bettington verticales, et O'Brien multitubulaires². La puissance absorbée par l'aéropulvérisateur n'est que de 30 watts par kilo de charbon brûlé par heure.

M. Marconnet a créé un remarquable gazogène alimenté de combustible en poudre par un ventilateur soufflant; les cendres forment un laitier que l'on évacue par un trou de coulée³.

En Amérique, en Suède, en Suisse, en Angleterre le système de la pulvérisation a été appliqué aux chaudières de locomotives: on a réussi à placer sur un seul foyer jusqu'à cinq

1. Voir pour plus de détails: FOURNIOLS: *Le chauffage industriel par le charbon pulvérisé*; *Revue générale des Sciences*, 29 février 1920. — Prospectus de la Société La Combustion rationnelle, avec illustrations.

2. Voir à ce sujet un travail de M. Piernet dans la *Revue générale de l'Electricité*, 29 juin 1918.

3. MARCONNET: *Les Gazogènes*; Chimie et Industrie, tome II.

brûleurs pouvant consommer chacun plus de 1.500 kilos par heure. La mise en pression est extrêmement rapide.

Les divers appareils que je viens de décrire trop sommairement sont tous de nature à procurer une économie réelle de combustible, quand ils sont appliqués dans les meilleures conditions de leur emploi ; nous dirons d'eux ce qu'on a dit des hommes : *the right... machinery, in a right place*. Je me garderai de laisser voir une préférence pour l'un ou l'autre d'entre eux, laissant aux inventeurs et constructeurs le soin de se faire valoir ; ils n'y manquent pas du reste.

Mais je tiens à signaler qu'ils peuvent presque tous rendre service, même dans les usines de moindre importance, presque aussi bien que dans les chaufferies des grandes centrales, qui n'ont pas le monopole des fonctionnements économiques, quoi que l'on ait pu en dire et même en croire.

*
* *

Je ne reviendrai pas sur ce que j'ai exposé précédemment de l'emploi comme combustibles des pétroles bruts et des résidus de pétrole, mazouts et astakis, dont le pouvoir calorifique élevé met le kg. à parité de 1,5 à 1,75 kg. de bonne houille, et qui se prêtent d'une façon remarquable à une utilisation excellente de leurs calories. On peut estimer aujourd'hui qu'il y a avantage à brûler

du mazout dans les foyers, tant que son prix n'est pas supérieur à deux fois et demi celui du charbon. Les Américains emploient leur *fuel-oil* avec avantage depuis de longues années dans leurs usines, leurs chemins de fer, leur marine et leur métallurgie ; les Russes étaient entrés avec succès dans la même voie, et il faut espérer que l'abaissement des droits d'entrée permettra à l'industrie française de suivre leur exemple.

Nous disposons d'ailleurs chez nous d'huiles de goudron, fournies par nos usines à gaz et nos fours à coke, de brais fluides et de poix fusibles, qu'on emploie dans de bonnes conditions à l'aide des brûleurs Omega, Minne, Charmic et autres, ainsi qu'il ressort d'expériences décisives faites en France et en Suisse.

La technique de la combustion des huiles est aujourd'hui établie sur des bases solides et rationnelles ; une pulvérisation complète, effectuée par des appareils simples et indé réglables, sur des produits conservant une fluidité suffisante, assure une combustion parfaite, si l'air est donné dans la proportion qu'il faut et si le volume de la chambre correspond bien au poids de liquide à brûler et aux surfaces à chauffer.

Des essais effectués sur une chaudière Babcock et Wilcox en Angleterre, avec un brûleur Peabody, ont fait constater un rendement remarquable de 73,4 % pour le générateur seul. Avec un brûleur Hammel on a obtenu 81,4 %, en consommant une huile brute d'Oklahoma.

Dans un même générateur on a poursuivi des essais parallèles avec un charbon de bonne qualité, à 15 % de cendres, et avec du mazout; par kilowatt-heure, on a consommé 1 k. 280 de houille contre 868 grammes de mazout.

On m'a communiqué des essais faits sur une chaudière Kestner originairement à grille mécanique, sur laquelle on avait monté deux brûleurs, l'un de 4 mm. l'autre de 3 d'orifice, pour l'emploi d'un goudron à 9.000 calories: dans un essai d'une durée de 11 heures, on vaporisa 2.756 kilos d'eau par heure, sous une pression de 10,5 kilos : centim², en dépensant 200 kilos de goudron; la proportion d'anhydride carbonique atteignit près de 16 % à un moment donné, avec un rendement de plus de 90 %. Le goudron exigeait un réchauffage et une pulvérisation, qui coûtait 5,4 % de la vapeur produite.

Les procédés de distillation et de gazéification, dont nous allons nous occuper, donnent à ces essais un grand intérêt et une séduisante actualité, puisqu'ils nous permettent d'utiliser des produits, fabriqués dans le pays, pour lesquels nous devons arriver à nous rendre indépendants de l'étranger.

*
* *

Si les combustibles solides pulvérisés et les liquides, dont nous venons de parler, présentent pour leur emploi dans les foyers de tout genre

de précieux avantages et se prêtent à une utilisation excellente, les combustibles gazeux ne leur sont nullement inférieurs et l'on revendique pour eux, à bon droit et pour des causes analogues, les mêmes facilités d'usage et une égale prééminence de rendement, sur lesquelles je ne pourrais revenir sans me redire.

Des brûleurs de types assez différents ont été proposés pour assurer un contact intime et sûr des éléments comburants et combustibles ; il faut moins d'imagination et de génie inventif pour les concevoir que d'habileté pour les exécuter et surtout d'esprit pratique pour les installer dans les conditions les plus avantageuses. Une innovation intelligente a donné d'heureux résultats ; elle a consisté à mêler préalablement le gaz à brûler à une certaine quantité d'air oxydant, avant de l'amener à l'appareil dans lequel s'effectue la combustion, au contact de l'air fourni d'autre part ou rencontré dans l'atmosphère. Tout retour de flamme dans le mélange, qui peut être tonnant, est rendu impossible, si la vitesse de la veine gazeuse reste constamment supérieure à la vitesse de propagation de la flamme dans ce mélange, condition qu'il est toujours facile de remplir : des dispositifs d'arrêt par toiles métalliques, par sections chicanées ou par d'autres moyens, interviendront d'ailleurs en cas d'accident imprévu dans le fonctionnement.

Le Professeur Bone, de Leeds, reprenant des expériences classiques de sir Humphry Davy, de

1816, et une tentative d'application pratique, effectuée par l'ingénieur Fletcher, en 1887, a réalisé un mode de combustion des gaz, qu'on a nommé « combustion catalytique » ou encore « combustion sans flamme » : la méthode consiste à projeter un mélange de gaz et d'air, soigneusement dosé, dans la proportion théorique de combinaison complète, sur du platine ou un autre métal, et mieux encore sur ou bien à travers un corps poreux réfractaire, préalablement chauffé au rouge sombre; la masse passe rapidement au rouge vif, et l'incandescence ainsi développée persiste aussi longtemps que dure la projection ou l'afflux gazeux, en développant et en rayonnant un calorique intense¹. M. Bone a établi sur cette donnée diverses sortes de foyers pour l'usage domestique, la concentration des sirops, le chauffage de creusets, etc.; puis il est venu à construire pour l'industrie une chaudière, dite « sans flamme », qui est une multitubulaire dont les tubes à fumée sont bourrés de fragments de briques réfractaires; un ventilateur aspire à travers ces tubes un mélange de gaz et d'air dosé, qui y brûle en maintenant au rouge leur contenu et en chauffant l'eau qui les entoure et circule autour d'eux.

Ci-dessous les résultats d'un essai, de 10 heu-

1. BONE : *op. cit.*, page 445. Voir aussi l'article publié dans la *Revue générale des Sciences*, le 15 mai 1919, par M. DESMARETS, sous le titre de : *La combustion par surface*.

res, effectué sur une telle chaudière, par une commission américaine.

Pression de la vapeur	6,8 kgs.
Pouvoir supérieur du gaz	45,5 calories.
Siccité de la vapeur	99,3 %.
Rendement	92,7 %.

La combustion avait été complète, attendu que les fumées renfermaient 1,2% d'oxygène, 18,1% de CO² et pas du tout de CO : aussi le rendement de cette chaudière s'est-il élevé à une valeur inconnue pour tout autre générateur de vapeur. Mais il faut noter que le ventilateur avait absorbé une puissance de 8,2 chevaux.

Ces chaudières sont d'une stabilité remarquable à tous égards.

Les tubes ne subissent aucune altération qui puisse donner des craintes sur leur résistance ; on modifie du reste leur forme, quand on emploie des gaz de gazogènes ou de hauts fourneaux entraînant avec eux des poussières. En Angleterre et en Amérique, le système a été appliqué en métallurgie avec un égal succès, pour des fours de trempe et des fours à recuire.

Les procédés de la *Surface Combustion C°* de New-York dérivent de la même idée ; ils ont trouvé surtout leur emploi dans les fours, en recourant de préférence à un brûleur à projection, dit *impact type*. Une simple tuyère projette à grande vitesse le mélange gazeux sur un lit de matériaux réfractaires en fragments, et la combustion se localise au point que l'on veut : pour

empêcher le nez de cette tuyère de s'échauffer outre mesure, on le refroidit par une circulation d'eau et mieux encore par un dispositif à ailettes rayonnantes. On fait aussi usage de brûleurs *Tunnel*, et de brûleurs à jets opposés assurant de même une utilisation parfaite. La Compagnie générale de Construction de fours a acquis en France la licence d'exploitation de divers brevets américains, qui donnent d'excellents résultats avec du gaz de ville surpressé à 700 gr., et du gaz de gazogène à 50 gr., ou moins encore, et se prêtent à d'importantes installations.

Les gaz combustibles de toute origine conviennent à ces diverses applications.

Les Américains ont la bonne fortune de disposer de gaz naturels, qui jaillissent du sol, en Pensylvanie, dans l'Ohio, etc.; on en alimente des foyers, des aciéries, des verreries, des usines de produits céramiques et de nombreuses chaudières à vapeur dans des conditions économiques exceptionnelles, puisqu'il n'y a qu'à prendre le gaz et à le distribuer.

Le Canada, la région du Caucase, la Chine, l'Australie, la Haute-Autriche, la Hongrie, l'Angleterre possèdent aussi des sources de gaz; dans le bassin de la Sarre, on a même pu utiliser un dégagement de grisou. Pour nous, en dehors de quelques jets captés à Bugey, dans l'Ain, et à Pechelbronn, dans le Bas-Rhin, nous ne disposons que de gaz fabriqués dans des cornues ou des fours à coke, par distillation, dans des hauts

fourneaux, dans des opérations de réduction de minerai, ou dans des gazogènes par gazéification.

Le gaz riche des usines à gaz des villes est frappé de droits de monopole et de canalisation, qui limitent son emploi industriel. Celui des fours à coke est un sous-produit d'une opération fructueuse par elle-même, qui donne, par récupération et régénération, outre le coke et divers carbures, une proportion considérable d'excellents gaz, dont une partie est consommée sur place, pour chauffer les fours qui les engendrent, mais dont le reste est utilisé dans des fours métallurgiques, Siemens-Martin et autres, et sous des chaudières à vapeur, procurant de la sorte au pays une économie considérable de combustible, dont nous avons méconnu longtemps l'importance, alors qu'en Angleterre et en Allemagne on en tirait parti déjà dans des conditions remarquables. Il est vrai que la majeure partie des gaz engendrés par les fours à coke va aujourd'hui à des moteurs, qui en utilisent souvent mieux les calories, et développent en tout cas une puissance double de celle que donnent les machines à vapeur, alimentées par les générateurs chauffés au gaz¹. Nous aurons à revenir sur cette question, ainsi que sur celle des gaz de hauts fourneaux, qui en est connexe. Disons

1. Qu'on me permette de renvoyer à ma *Dernière Evolution des Moteurs à gaz* (Paris, Louis Geisler, 1910), pages 19, 96, etc.; voir aussi la 4^e édition de mon *Traité des Moteurs à gaz*, aux chapitres des gaz et des gazogènes.

seulement que, s'il a été déjà réalisé beaucoup de progrès dans cette direction, il y a encore énormément à faire, surtout en France. C'est par millions qu'on peut estimer les tonnes de houille à gagner.

La métallurgie du cuivre fournit aussi des gaz combustibles ; à la Krughütte (c'est encore en Allemagne!), on recueille un gaz très pauvre, renfermant néanmoins jusqu'à 24 % de CO, qu'il faut laver et quelquefois enrichir, mais dont on tire parti.

En plus des gaz qu'il ne faut point laisser perdre, il y a ceux que pourrait nous donner le traitement méthodique des charbons, dont on s'est tant occupé en ces derniers mois, et qui semble devoir constituer une réforme radicale de procédés de combustion déclarés barbares et archaïques, donc surannés ; toute notre houille et tous ses succédanés devraient passer, dit-on, d'abord par des cornues de distillation et par des gazogènes, de manière à procurer une utilisation rationnelle et complète de tout ce qu'ils renferment. Ces projets, dont j'ai déjà entretenu mes lecteurs dans la première partie de cette étude, et auxquels je n'ai reproché que d'être trop vastes pour l'heure présente et de tendre à une révolution des procédés, plutôt qu'à leur lente évolution, ne sont pas nés d'hier ; les ingénieurs allemands les ont étudiés dès le début de la grande guerre, et le sous-secrétaire aux finances de l'Empire, comte von

Rædern, avait confié à quatre techniciens réputés de rédiger des Mémoires, qui devaient être soumis au Reichstag, au moment de la discussion des impôts dont on voulait frapper les combustibles¹.

J'ai ces Mémoires sous les yeux; ce sont des œuvres érudites : on n'attendait pas moins des docteurs et professeurs qui les ont écrites; on n'analyse pas en une page de semblables travaux, mais on peut exprimer l'impression qu'ils laissent dans l'esprit. Or, cette impression se traduit par de prudentes réserves. Voici une phrase imprimée en gros caractères dans la première étude du Professeur Docteur-Ingénieur h. c. N. Caro; après avoir reconnu les services qu'ont rendus les nouveaux procédés préconisés, il dit : « Dans un grand nombre de cas, au contraire, il est plus économique (*wirtschaftlicher*) et on est conduit à une moindre dépense de combustible (*und der Brennstoff sparend*), si l'on brûle celui-ci directement sans gazéification (*ohne Vergasung*) et sans récupération des sous-produits. »

1. Ces Mémoires ont été réunis et publiés sous le titre général suivant : *Die rationelle Ausnutzung der Kohle; Technische Gutachten zur Vergasung und Nebenproduktengewinnung* (Berlin, Carl Heymann, 1918). On a examiné d'abord la question dans sa généralité, puis l'emploi des sous-produits au double point de vue de la production de puissance motrice, et de leur valeur chimique; enfin le quatrième travail envisage surtout le côté économique de la thèse. Les auteurs sont les professeurs Caro et Klingenberg, le chimiste Russig et le directeur Lempelius.

M. Lempelius, dans le 4^e Mémoire, critique vivement des appréciations trop optimistes, basées sur une erreur qu'il signale, des Docteurs Besemfelder et von Dewitz, publiées en 1916, et il cite des chiffres extraits d'un bilan de l'usine de Charlottenburg (Berlin) qui, pour utiliser au mieux ses coques et ses benzols, mêlait à son gaz de distillation du gaz à l'eau carburé et n'avait rien gagné à le faire. Le Professeur Caro rappelle les difficultés qu'a rencontrées la Société Mond, qui avait monté une grande centrale dans le South-Staffordshire, où elle trouvait un charbon approprié à ses entreprises et peu cher; elle fabriquait jusqu'à 50 kg. de sulfate d'ammoniaque par tonne de houille et vendait son gaz à bon prix à un établissement ami voisin : l'affaire végéta quinze ans. L'impression générale que laisse l'étude du factum allemand est en somme peu encourageante : elle conseillait une attitude plus expectante qu'allante.

Les souvenirs personnels que j'ai gardés d'un arbitrage, qui m'avait été confié en pays étranger, il y a quelques années, ne me portent non plus à une confiance exagérée dans le succès de ce genre d'entreprises : une puissante centrale avait été créée, aux portes d'une grande capitale, pour utiliser certaines houilles bitumineuses que l'on recevait dans de bonnes conditions; des gazogènes Duff (du genre Mond) alimentaient de beaux moteurs à gaz, qui actionnaient directement des alternateurs; on récupérait benzols,

goudrons et produits ammoniacaux. Les gazogènes, les moteurs et les alternateurs étaient excellents ; mais les rendements en sous-produits, sur lesquels on avait compté pour réaliser un prix réduit du kilowatt-heure, ne furent point obtenus, nous en fîmes officiellement la décourageante constatation ; l'affaire périclita et aboutit à une onéreuse liquidation.

On pourrait encore évoquer l'exemple de certaines entreprises de fabrication et de distribution de gaz de chauffage, qui n'ont pas donné les résultats qu'on escomptait, bien que les pertes d'énergie entraînées par le transport des gaz fussent autrement faibles et inférieures aux pertes correspondantes au transport de l'énergie électrique.

« Vous mêlez les arguments économiques aux considérations techniques », me dit-on : je le reconnais, mais ils sont difficiles à séparer, car on monte généralement des centrales pour faire des affaires fructueuses et pour gagner de l'argent. Malgré cela, je m'incline devant l'objection et ne ferai pas état de l'abaissement des prix du coke, du goudron, du benzol et des produits ammoniacaux qui serait le résultat fatal du traitement de 32 millions de tonnes, par exemple, sur les 64 que nous consommons annuellement. Je ne parlerai donc pas de francs, je ne m'occuperai que de calories. Eh bien, si l'on s'en tient aux calories, il est incontestable que les calories disponibles dans les produits et les sous-

produits combustibles sont en nombre inférieur à celles de la houille d'où on les tire ; tous sont d'accord sur ce point, les Allemands, M. Métivier, M. Joulot et les autres ¹. Il n'en peut être autrement. En effet le traitement en gazéification et en récupération n'est pas gratuit ; je ne donnerai pas de chiffres, car on en a déjà alignés assez sur ce sujet. Je préfère présenter un raisonnement : dans un foyer bien conditionné, procurant une combustion complète, sans oxyde de carbone, ni hydrocarbures dans les fumées, perd-on du carbone, des benzols, des goudrons sans les brûler ? Nullement, on ne jette à l'air sans utilisation des calories que les produits ammoniacaux incombustibles qui n'en peuvent donner.

Quelle différence y a-t-il donc entre un foyer à combustion directe et immédiate et les appareils distillateurs et gazéificateurs ? Les premiers brûlent les éléments de la houille en un temps, tous ensemble, les autres les fractionnent et les séparent pour les utiliser au mieux, soit dans des foyers avec brûleurs à gaz, ou sous des chaudières plus perfectionnées, telles que les chaudières sans flamme, surtout dans des moteurs à gaz riches ou pauvres et des moteurs à combustion interne. Le bénéfice de l'opération se

1. Le remarquable travail de M. Métivier a déjà été plusieurs fois cité ; l'étude de M. Joulot, intitulée : *Sur l'utilisation judicieuse des combustibles*, a paru dans la *Technique moderne*, en décembre 1919.

recueille par suite dans le second temps. Il est appréciable dans certains foyers, nous l'avons vu ; il est beaucoup plus considérable dans les moteurs, mais exige le concours d'une technique très éclairée, d'une pratique fort avertie et d'un ensemble de conditions favorables, ainsi que nous le constaterons dans la suite de notre étude, dans laquelle nous formulerons les conclusions finales qui ressortent de cet intéressant débat.

L'ÉCONOMIE DES CALORIES

Les calories, produites dans les foyers, sont utilisées, en France, pour moitié directement, en nature, l'autre partie étant transformée en énergie mécanique.

Occupons-nous d'abord de la première part. Il faut empêcher que la chaleur ne se perde, c'est-à-dire qu'elle ne se dissipe d'une manière stérile, avant d'avoir achevé son œuvre, et qu'elle n'ait reçu l'application en vue de laquelle on l'avait engendrée. La perfection consisterait en ce que toutes les calories disponibles du corps qui les fournit passent à celui qui doit les recevoir : pour cela, il faudrait qu'il ne s'en égare pas en route, et qu'elles soient toutes acheminées vers le but auquel elles sont destinées. On emploie à cet effet les *calorifuges*. On a donné ce singulier nom aux substances isolantes, qui emprisonnent la chaleur, en diminuant le plus possible les phénomènes inévitables de rayonnement, de conductibilité et de convection. Il en est d'efficaces, parmi lesquelles sont au premier rang les terres fossiles, le liège, le feutre, etc., et toutes les autres matières qui confinent l'air et l'empêchent de se mouvoir : on en revêt les

corps chauds, les canalisations d'air chaud et de vapeur.

Bien que la chaleur soit éminemment mobile et difficile à enfermer, on réussit dans les moindres industries à diminuer ses pertes dans une large mesure : les procédés à employer sont compris de chacun, et tous en apprécient l'utilité et s'y emploient avec ardeur. C'est la source d'économies qu'il est le moins nécessaire de recommander : elle se fait d'elle-même.

Au lieu de considérer le calorique comme une chose qui ne cherche qu'à fuir, en se transportant des points les plus chauds vers ceux qui le sont moins, il serait plus vrai d'y voir une forme de l'énergie, qui ne peut se transporter qu'en se dégradant : c'est le concept énergétique ; il fait voir les choses d'un point de vue plus élevé et sous un jour plus lumineux. La chaleur ne se perd pas, dans le sens strict du mot, mais elle baisse de qualité, en baissant de température, jusqu'à devenir sans emploi : c'est ce qui arrive lorsque sa température est tombée au niveau de l'ambiance ; on la dit alors perdue, parce qu'elle est dégradée au point d'être inutilisable. Il faudrait qu'elle ne se dégradât qu'en faisant œuvre utile, en relevant le niveau de l'énergie possédée par les corps voisins, en produisant des travaux internes de changements d'état, fusion et vaporisation, etc. L'importance de cette manière de voir se révélera à nous par la suite de cet exposé.

Les opérations thermiques, effectuées dans

les exploitations industrielles, se traduisent toujours par des dégradations, qui se manifestent à nos yeux par des échanges ; il y a économie, lorsque ces échanges aboutissent tous à une utilité. Une chaudière à bouilleurs ne rend que 60 %, alors que des chaudières à foyers intérieurs, des semi et des multitubulaires donnent de 63 à 66 %, et même plus, dans des conditions d'ailleurs identiques, uniquement parce que les premières facilitent moins les échanges à travers le métal de leurs parois ; ce qui ne s'échange pas, entre les gaz chauds et l'eau à vaporiser, va chauffer l'atmosphère, sans avantage. Les réchauffeurs d'eau (si bien appelés des *économiseurs*) et les surchauffeurs de vapeur profitent de la dégradation qui a lieu du foyer à la cheminée : aussi avons-nous vu qu'ils peuvent élever le rendement d'une installation complète à 88 %. Il faut protéger les massifs des générateurs contre le rayonnement, qui donne lieu à un échange inopérant vers l'extérieur en chauffant des locaux dont la température est trop élevée. Tel four à réchauffer, tel four de fusion, de cémentation, tel four à réverbère vaut mieux qu'un autre surtout parce qu'il donne lieu à moins d'échanges avec l'ambiant ; le bénéfice de la cuisson des briques en four continu sur la cuisson en meules, en plein champ, n'a pas d'autre origine.

La concentration par la chaleur des dissolutions et des jus, telle qu'elle se pratique notamment en sucrerie, est un des plus curieux et des

plus remarquables exemples de ce qu'on peut économiser de calories, en conduisant la dégradation de l'énergie calorifique par échelons utiles vers son terme, qui est sa forme inférieure. Autrefois on chauffait les bassins à feu nu, puis on les chauffa à la vapeur; ce fut ensuite un grand progrès de produire l'évaporation dans le vide, parce qu'il faut moins de calories pour obtenir le même effet, qui est un départ d'eau sous forme de vapeur; mais on fit beaucoup mieux encore en imaginant les appareils à *multiple effet*, qu'on ne peut assez louer et admirer. Dans une série de vases clos, communiquants, la vapeur née dans le premier, chauffé par une source extérieure, porte sa chaleur latente de vaporisation au second vase, et elle y vaporise du liquide; la vapeur ainsi engendrée dans ce dernier va opérer de même dans le troisième, et cela pourra se continuer de la sorte sans limite, pourvu qu'on maintienne dans les vases, formant la cascade, un vide de plus en plus parfait, qui abaisse la température de l'ébullition et assure encore la possibilité de la vaporisation.

Chaque vase est, pour celui qui le suit, une chaudière, et il remplit pour celui qui le précède l'office d'un condenseur. L'énergie se dégrade d'un vase à l'autre : elle le fait utilement. En pratique, on se borne au triple effet : les vases sont aux températures décroissantes de 90, 80 et 70°. Il ne s'échappe de l'appareil aucune vapeur,

celle du dernier vase étant condensée dans un serpentín de chauffage des jus, à une température de 60° environ. Le vide à maintenir entraîne une certaine dépense d'énergie, dont il faut évidemment tenir compte dans le bilan de l'opération ; mais ce travail est généralement produit par une machine à vapeur à échappement libre, dont la vapeur de décharge chauffe précisément le premier vase. La concentration des jus ainsi effectuée procure une économie nette de 30 % au moins sur l'évaporation à l'air libre. Etant donné que le traitement de 1.000 kg. de betteraves exige la concentration de près de 1.300 kg. de jus sucrés, on peut apprécier le bénéfice que procurent les appareils que nous venons de décrire. Ajoutons qu'ils font économiser des calories et du temps ; des deux choses on peut dire... *is money.*

Les vapeurs, qu'autrefois on laissait perdre à l'air, sont aussi utilisées avantageusement dans un grand nombre d'industries, et notamment en brasserie. Les machines à vapeur des brasseries produisent de la puissance motrice pour le pompage de l'eau et des moûts, le vaguage, le nettoyage des fûts, la production de la glace, etc. Il faut d'autre part de l'eau chaude pour donner les trempes, laver les tonneaux, etc. : on les obtient en dirigeant la vapeur d'échappement de la machine motrice à travers des serpentins en cuivre rouge, montés dans des bacs en tôle, placés dans une partie élevée de l'usine. Quand

les eaux sont fortement calcaires, les serpentins s'incrustent rapidement; dans ce cas, il est intéressant de déshuiler la vapeur de décharge et de chauffer les eaux par barbotage direct. Une machine de 15 chevaux peut donner 200 hectolitres d'eau à 100°. On récolte aussi les vapeurs des pompes à vapeur.

Je pourrais multiplier ces exemples, mais je juge inutile d'entrer dans plus de détails : qu'on retienne seulement la perfection avec laquelle on utilise aujourd'hui les restes.

Des progrès plus considérables encore ont été réalisés en métallurgie ; nous avons vu qu'elle consomme près du cinquième du charbon que nous employons par an en France, et elle se prête mal à l'utilisation des adjuvants de la houille, car c'est l'énergie calorifique dont elle a besoin. Les pertes de calories y étaient autrefois scandaleuses, mais de grandes réformes sont intervenues, et il est loin le temps où Victor Hugo voyait la vallée de la Meuse éclairée par les flammes qui s'échappaient des appareils de la sidérurgie. On commença par adosser des chaudières aux fours à puddler, à réchauffer et aux autres : Pécelet parlait déjà d'une production de 525 kg. de vapeur à 6 kg. par heure, pour un four à réchauffer brûlant 100 kg. de houille. Pour ce qui est des hauts fourneaux, les ingénieurs français Aubertot, Faber du Fau, puis Thomas et Laurens imaginèrent les prises de gaz, par lesquelles on les capte avant tout contact

avec l'air, pour les canaliser et les conduire aux fours, aux générateurs de vapeur et surtout aux réchauffeurs d'air Whitwell et Cowper, et autres : le chauffage du vent récupère près du tiers des calories du combustible introduit dans un grand fourneau ; le reste n'est point perdu, nous le verrons plus loin. Il est des établissements dans lesquels on brûlait, il y a quelques années encore, 5.300 tonnes de houille crue par mois et où l'on n'en consomme plus que 600.

*
**

Une des plus admirables et des plus fécondes inventions des temps modernes a été l'utilisation de ce qu'on appelait « la puissance motrice du feu » ; les maîtres qui ont substitué aux bras de leurs semblables les muscles de fer et d'acier des machines ont réalisé une œuvre grandiose, car ils ont inauguré une ère nouvelle, en abolissant « l'esclavage qui tue », comme le disait éloquemment le P. Gratry. Mais je n'ai pas à traiter ici de l'importance morale de cette conquête du génie humain¹ ; je ne m'occuperai donc que de l'économie de calories qu'il nous reste à poursuivre, en 1920, dans les machines thermiques.

On nomme ainsi les machines qui ont pour objet de transformer l'énergie calorifique en

1. WITZ : *Les machines à feu, leur rôle et leur évolution* ; discours présidentiel prononcé à la Société des Sciences de Lille, en 1912 (Lille, Danel).

énergie mécanique ; pour préciser, ce sont les machines à vapeur et à air chaud, les moteurs à gaz tonnants, les moteurs à pétrole et généralement les moteurs à combustion interne.

Ces machines thermiques, quelque merveilleuses qu'elles soient, ont perdu de leur prestige depuis qu'on a comparé leur rendement à celui des machines hydrauliques ; alors qu'en accouplant une turbine à eau avec une génératrice d'électricité le coefficient d'utilisation atteint de 87 à 90 %, on n'obtient, dit-on, en brûlant du charbon dans le foyer d'une chaudière alimentant une excellente machine à vapeur, que 14 % en travail indiqué, soit 12,6 % en travail effectif¹.

Ces résultats, communiqués à un public mal averti, sans y joindre le commentaire nécessaire, ont créé une mentalité erronée, que je voudrais déraciner des esprits qui s'en sont laissé imposer par ces chiffres.

On n'a pas le droit de mettre en parallèle le rendement des machines de nos stations hydro-électriques avec celui des stations thermiques, attendu que ces rendements ne sont pas comparables ; dans le premier cas, c'est de l'énergie mécanique qui se transforme en énergie électrique, de même valeur ; dans le second cas, le foyer

1. Je renverrai de nouveau le lecteur à mon article de 1902 sur le « rendement comparé des machines à vapeur et des moteurs à gaz », paru dans *l'Eclairage Electrique*.

et la machine transforment de l'énergie calorifique, d'un degré inférieur à l'énergie mécanique, en énergie électrique, elle-même d'un degré supérieur. Que l'énergie calorifique soit une forme d'énergie de moindre valeur que l'énergie mécanique, c'est un fait d'expérience indiscutable; en effet, les kilogrammètres donnent toujours des calories, quel que soit le mode de transformation adopté; mais il faut recourir à des artifices appropriés et à des dispositifs spéciaux pour tirer des kilogrammètres hors des calories. La première conversion s'opère fatalement et le voiturier qui néglige de graisser abondamment les fusées de ses essieux en fait la désagréable constatation; la conversion inverse n'est devenue possible qu'à la suite d'un grand et long effort du génie humain. Il y a plus : non seulement le travail se transforme en chaleur spontanément et directement, mais il se transforme intégralement; 425 kilogrammètres font toujours naître une calorie, mais, quand une calorie est mise en état d'engendrer des kilogrammètres, elle n'en donne jamais 425, car *elle ne peut pas les donner*. Le rendement du cycle de Carnot, qui est un rendement maximum, n'est égal qu'à 46 % entre les limites de 300° et de 35°, températures d'un surchauffeur et d'un condenseur excellents; dans une machine à vapeur, fonctionnant dans ces conditions, une calorie ne fournira que $425 \times 0,46 = 195,5$ kilogrammètres. Pourquoi lui en demander 425, ainsi qu'on le fait en calculant par

le procédé habituellement en usage ce qu'on est convenu d'appeler le rendement de la machine¹ ?

Hirn, qui joignait au savoir d'un thermodynamiste les connaissances d'un ingénieur, doublé d'un industriel, s'était rendu compte de la fausseté du concept du rendement *thermique*, et de l'appréciation pessimiste qu'il ferait naître dans l'esprit de ceux qui lui prêteraient une valeur absolue, alors qu'il ne peut servir de base qu'à une comparaison. Il proposa donc de considérer le rapport entre le rendement estimé de la sorte, et celui du cycle de Carnot, compris entre isothermiques et adiabatiques ; c'était la manière de donner la note vraie ; ce rendement caractéristique des genres devait recevoir le nom de rendement *générique*. Pour le coup, l'idée était juste et le mot heureux ; malgré cela, il ne s'est pas répandu. On compare plus souvent la consommation de vapeur constatée par les essais, à celle que présenterait une machine type, travaillant entre les mêmes limites de température et de

1. On calcule ce rendement en faisant le rapport entre le nombre de calories équivalant aux 270.000 kilogrammètres du cheval-heure, égal à $\frac{270.000}{425} = 635,29$, et le nombre de calories réellement dépensées pour obtenir ce cheval-heure. Ainsi, le rendement thermique *indiqué* s'obtient en divisant 635,29 par les calories de la vapeur consommée par cheval-heure indiqué ; on aurait le rendement *effectif* en prenant les calories dépensées par cheval-heure effectif. Cette manière de calculer s'applique à tous les moteurs thermiques, quels qu'ils soient, à vapeur, à gaz ou à pétrole ; c'est l'avantage qu'elle présente.

pression, et l'on prend généralement comme cycle de cette machine réputée parfaite celui de Rankine adopté par Clausius, dans lequel l'admission et l'échappement s'opèrent à pression constante, la compression et la détente s'effectuant suivant des adiabatiques ; on admet que la détente est complète jusqu'à la pression de l'échappement. Les auteurs réservent au rendement ainsi déterminé la qualification de rendement *thermodynamique*¹ ; on s'en sert beaucoup aujourd'hui, et avec raison ; mais il ne s'applique qu'aux seules machines à vapeur, et l'on peut regretter l'introduction d'un mot nouveau dans la technique des machines motrices, déjà fort encombrée

1. M. Rateau a dessiné une abaque donnant la consommation d'une machine thermique, cycle de Rankine, par cheval-heure indiqué pour des pressions déterminées d'admission et d'échappement ; il n'y a qu'à diviser cette consommation par la quantité de vapeur dépensée, dans les mêmes conditions de pression, par la machine mise en expérience, pour obtenir immédiatement la valeur de son rendement thermodynamique. A défaut de cette intéressante et utile abaque, on procède à la détermination de ce rendement par le calcul qui suit : on compare l'équivalent calorifique des 270.000 kilogrammètres qui correspondent au cheval-heure, soit 635,29 calories, avec la quantité de chaleur transformée en travail par détente adiabatique, dans le cycle-type, entre les pressions et températures d'amont et d'aval de la machine considérée. Par kg. de vapeur, cette quantité est donnée par la différence h , d'ordonnées, pour ces limites, dans le diagramme J. S. (chaleur-entropie) de Mollier ; pour P kg. de vapeur par cheval-heure, on a donc Ph . Et le rendement thermodynamique cherché R est égal à $\frac{635,29}{Ph}$.

de rendements divers, qui déroutent les profanes.

Que l'on fasse usage du rendement générique ou thermodynamique, on est conduit à une appréciation plus saine, plus juste et plus encourageante de la valeur d'un moteur thermique; nous devrions tous prendre l'habitude de cette terminologie plus rationnelle que l'ancienne; mais il est plus aisé de créer une bonne pratique que d'en réformer une mauvaise.

L'adoption des rendements génériques ou thermodynamiques réhabiliterait la machine à vapeur, que l'on semble vouloir déprécier à plaisir. Voici, par exemple, une machine monocylindrique de 200 chevaux, à condensation, alimentée de vapeur saturée et sèche, consommant 6,5 kg. de vapeur par heure et par cheval indiqué, sous 7,5 kg. de pression à la chaudière; c'est une bonne machine ordinaire. Son rendement thermique n'est pourtant que de 14,8 %, mais son rendement générique prend la valeur de 49 %, et son rendement thermodynamique dépasse 59 %. Il y a loin encore de l'utilisation qu'une théorie idéale assigne à une machine parfaite. Toutefois remarquons que le cycle réel, suivi dans les opérations, est soumis à des imperfections que l'on connaît, et qu'il est pour ainsi dire impossible de corriger; et qu'il y a des pertes inévitables de tout genre. Cela étant, une machine qui est plus qu'à moitié chemin de la perfection n'est pas si condamnable qu'on veut le dire, et il n'y a pas

de raison de lever les bras au ciel en déplorant la pitoyable utilisation de nos précieuses calories. L'exemple choisi est du reste emprunté à la vie industrielle courante et nous trouverons mieux dans la suite de cette étude.

J'ai cru nécessaire de présenter ces considérations avant d'aborder la question des économies à réaliser dans les machines motrices, actionnées par la chaleur.

*
* *

La machine à vapeur est sortie du cerveau génial de Watt et de ses mains d'habile mécanicien, armée de toutes pièces, enveloppes de vapeur et cylindres multiples y compris, mais c'est Sadi Carnot qui a pénétré le mystère de son fonctionnement.

Les Anglais gardèrent jalousement, le plus longtemps qu'ils purent, le monopole de sa construction et de son emploi : c'est elle qu'ils sauvèrent dans la terrible crise économique qu'ils traversèrent au sortir des guerres de l'Empire, après avoir vaincu à Waterloo. Mais c'est chez nous que le concept théorique du moteur à feu est né ; nos thermodynamistes ont compris son importance et l'ont développé. Les noms de Combes et de Dupré méritent d'être retenus.

Mais c'est à l'esprit positif et pratique d'un Alsacien, filateur de coton et correspondant de l'Institut de France, à Hirn, qu'il était réservé de

se dégager le premier de la fiction des formules incomplètes et des schémas irréels, et de découvrir un facteur insoupçonné, mais prépondérant pour la consommation : l'action de paroi. Il a remis en faveur l'enveloppe de vapeur, la détente en cylindres étagés et la surchauffe de la vapeur. Le maître de l'École de Mulhouse a plus fait pour l'économie du fonctionnement que Clausius et Zeuner; ceux-ci étaient des théoriciens plus consommés que lui, mais il manquait à ces professeurs éminents d'avoir expérimenté sur une machine en service industriel. La machine classique de la filature du Logelbach, près de Colmar, devra être conservée avec le même soin religieux que les machines de Bordesley et d'Ocker Hill que les Anglais ont remises en marche au cours des fêtes du centenaire de Watt.

En revenant à la distribution par quatre tiroirs, l'Américain Corliss obtint une souplesse et une régularité de marche inconnues jusque-là : il releva sur ses machines des diagrammes de formes impeccables; mais cette élégance des tracés n'est qu'une coquetterie dans l'espèce, ainsi que l'ingéniosité des déclics et la perfection des obturateurs cylindriques, soupapes équilibrées et pistons-valves en usage aujourd'hui. C'est toujours aux idées alsaciennes sur les influences des parois qu'il faut en revenir, pour réaliser un fonctionnement économique.

Une machine, d'une puissance de 2.000 chevaux, à triple expansion, avec condensation,

alimentée de vapeur sous 12 kg. de pression, surchauffée à 325°, prise dans d'excellentes conditions d'entretien, peut arriver aujourd'hui à ne consommer que 4.250 grammes de vapeur par cheval-heure indiqué, soit 4.620 grammes par cheval-heure effectif¹; cela fait 3.106 et 3.377 calories. En bon charbon moyen, d'un pouvoir supérieur de 7.500 calories, le générateur de vapeur pourvu de tous ses accessoires, possédant un rendement de 88 %, ces consommations ressortent à 470 et 510 grammes par cheval-heure indiqué ou effectif. Les rendements thermiques correspondants sont égaux à 0,24 et à 0,19. S'ils ont pu être dépassés, c'est qu'on avait affaire à un merle blanc que l'on devrait mettre dans un musée. Mais cet oiseau rare pourrait peut-être devenir plus commun.

On gagnerait peu de choses à porter la puissance à 4.000 chevaux, comme l'ont fait d'habiles constructeurs américains et belges; en effet, la consommation par unité de puissance ne diminue qu'insensiblement à partir de 1.000 chevaux. D'ailleurs, il faut noter que de petites demi-fixes du type Wolff ont développé le cheval-heure indiqué par 4.849 grammes de vapeur à 12 kg. de pression, surchauffée à 330°, dans les essais effectués à Dresde par M. Lewicki; il s'agissait d'une machine de 100 chevaux. Si ce chiffre de consom-

1. J'estime le rendement organique à un maximum de 0,92.

mation provoquait quelque scepticisme ¹, je citerais les résultats d'un essai de l'Association Alsacienne, qui a porté sur une autre demi-fixe, de 200 chevaux, du type Badenia, alimentée sous 9,85 kg. de pression ; ce moteur consomma 5.480 grammes de vapeur (le rapport n'a pas indiqué le degré de surchauffe) par cheval-heure indiqué, et 650 grammes de charbon. Il serait illusoire, d'après ces chiffres, de chercher l'économie du combustible par la construction de machines à piston et mouvement alternatif d'une puissance plus grande que par le passé.

Faut-il marcher à une pression de vapeur plus considérable ? On se tient généralement à 9 ou 10 kg. ; bien qu'il en coûte peu de porter le timbre des chaudières à des pressions plus élevées, on ne gagne pas beaucoup à le faire. Un kilog d'augmentation de pression ne donne qu'un bénéfice de 1 0/0 sur le rendement, et ce bénéfice est moindre encore au delà de 12 kg.

On se déclare satisfait d'un vide de 85 % ; il n'y a pas beaucoup d'intérêt à l'améliorer, pour les machines à piston, que nous considérons en ce moment.

Il faut, autant qu'il se peut, que les machines travaillent à pleine charge, mais on s'y applique

1. Le professeur Josse a même relevé, sur une demi-fixe de 50 chevaux, une dépense de 595 grammes de charbon par cheval-heure effectif ; ce chiffre paraît être le record dans l'espèce.

dans la mesure du possible, et il n'y a pas à s'inquiéter outre mesure d'un fonctionnement momentanément à charge réduite. Le tableau ci-dessous en témoigne :

Compound : diamètres de piston, 0 m. 650 et 1 m. 100 ; course, 1 m. 100 ; vitesse, 100 tours : minute ; pression, 12 k.; surchauffe, 300°.

Degré d'admission	Puissance en chevaux		Consommation de vapeur par cheval-heure indiqué
	indiquée	effective	
4/100	725	600	4 k.,850 gr.
6	1.075	940	4 k.,600
8	1.275	1.275	4 k.,500 dépense minimum
10	1.500	1.350	4 k.,700 gr.
12	1.700	1.350	4 k.,900

C'est à la surchauffe que j'attache le plus de prix : une surchauffe même modérée présente le grand avantage de sécher la vapeur, et l'on sait combien il importe d'assurer la siccité de la vapeur ; d'autre part, ce serait une erreur d'exagérer la surchauffe, car le plus clair du bénéfice est obtenu vers 300° ou 325°, avec le minimum d'ennuis, pour une vapeur possédant une température de saturation de 175°. On peut estimer dans ces limites qu'une surchauffe de 10° fait gagner généralement de 100 à 200 grammes sur la dépense de vapeur par cheval-heure indiqué, mais il est difficile de donner des précisions à cet égard. En effet, la surchauffe est un remède très actif pour certaines machines moins bien conditionnées ; c'est un simple adjuvant pour

d'autres plus parfaites. Pour les premières, le bénéfice à réaliser est quelquefois considérable ; j'ai vu, dans une machine à grande vitesse de 250 chevaux, une consommation de vapeur saturée tomber de 7 à 5 kg. par cheval-heure indiqué pour une surchauffe de 300° : on peut donc dire que, dans certains cas, la surchauffe ne se recommande pas, elle s'impose. Dans d'excellentes machines, à multiple expansion, pourvues d'enveloppes de vapeur efficaces, il semblerait que la surchauffe soit une superfétation ; il n'en est rien : l'expérience montre qu'alors même on gagne souvent encore 100 grammes par 10 degrés. La surchauffe n'étant point un effet obtenu gratuitement, l'économie de vapeur ne se traduit pas adéquatement par une économie égale de charbon, mais elle est néanmoins une source d'économies qu'aucun industriel ne devrait négliger et qu'on aurait tort de ne pas appliquer dans toute installation nouvelle.

C'est ce qui se fait du reste. Sur 37 essais de consommation, effectués, pendant l'exercice 1912, par l'Association Alsacienne, il n'y en a eu que 7 qui aient porté sur des machines alimentées en vapeur saturée.

Aussi les résultats obtenus dans l'industrie privée sont-ils remarquables : sur les 37 machines dont je viens de parler, il ne s'en est trouvé que 4, qui aient été inférieures à ce qu'on est en droit d'attendre d'une installation actuelle. Pour les 33 autres, voici les consommations de vapeur

et les rendements thermodynamiques calculés
par M. Kammerer :

	Machines monocylindriques	Machines Compound
Nombre	14	19
Puissance en chevaux indiqués	44 à 557	68 à 831
Consommation de vapeur par cheval-heure indiqué	9 k.,630 à 4 k.,720	9 k.,640 à 4,860
— en calories	6364 à 3414	6809 à 3646
Rendement thermodynamique	47,9 à 73,3	54,3 à 76,1

Ce parallèle n'a qu'un but; c'est de faire constater que nos industriels savent ce que valent les calories, et que la majorité d'entre eux en tire le plus de kilogrammètres qu'ils peuvent : il sera difficile, mais non impossible, d'obtenir mieux.

Ceux d'entre eux qui ont l'emploi du calorique en nature, dans leurs usines, ont su réaliser des économies de combustible, dont j'ai déjà signalé l'importance, mais sur lesquelles je crois devoir insister. Souvent la quantité de vapeur nécessaire est moindre que celle que la machine motrice consomme pour actionner les ateliers, auquel cas on monte une machine à contre-pression, qui détend utilement dans son cylindre la vapeur de chauffage, et on lui accouple une machine auxiliaire à condensation, développant le supplément de puissance nécessaire.

On peut encore faire emploi d'une machine à double fin, une compound, sur le receiver de laquelle on pratiquera une dérivation. Au cas où il faut plus de vapeur que le moteur n'en débite, on fera échapper toute sa décharge dans des

canalisations de chauffage, à la pression requise, et le surplus sera demandé à des chaudières sous forme de vapeur vierge. Dans les deux hypothèses, l'économie est grande; je renonce à la chiffrer, car elle dépend des conditions d'emploi et d'installation¹. Le procédé est applicable aussi bien aux turbines qu'aux machines à piston, mais les premières permettent notamment de dériver sous plus haute pression : on peut obtenir par elles de la vapeur de chauffage ayant une pression de 6 kg. par cm², tandis que les machines à piston ne permettent guère de dépasser 2 kg.

M. Rateau est arrivé aussi à de remarquables résultats en utilisant les vapeurs d'échappement de machines à marche intermittente, telles que les machines d'extraction ou de laminoirs; ces vapeurs sont reçues dans un accumulateur, puis utilisées par des turbines à basse pression, construites pour recevoir un appoint de vapeur vive, lorsque la décharge donne une quantité insuffisante ou qu'elle est même entièrement supprimée. Les installations des mines de Béthune et de Liévin sont connues et elles ont donné la preuve des avantages du système, qui n'a pas tardé à être apprécié et a reçu de nombreuses applications; la puissance ainsi récupérée en

1. Voir sur ce sujet l'étude très documentée de M. Kammerer, publiée dans le *Bulletin de l'Association Alsacienne*, de l'année 1912.

France atteint plusieurs centaines de mille chevaux. Ces applications ont été étendues à des combinaisons de turbines avec des machines à piston à marche continue, avec non moins de succès. On adjoint à une compound alternative une turbine à basse pression, qui remplace le grand cylindre : il y a avantage à cette substitution, par le fait que le rendement des roues à basse pression est supérieur à celui du second cylindre à piston, dans lequel la condensation sur les parois (et ce que Hirn avait appelé la *perte au condenseur*), le rayonnement et les frottements occasionnent des déchets, que l'art des ingénieurs n'a pu supprimer. Les résultats du système Rateau sont doubles : on augmente la puissance des moteurs et l'on améliore leur rendement. Dans un peignage de Roubaix, une compound de 950 chevaux indiqués, dépensant 8.500 kg. de vapeur à l'heure, a développé ainsi 800 chevaux par ses propres moyens, plus 535 chevaux sur l'arbre de la turbine qu'on lui a adjointe, en ne dépensant plus que 8.000 kg. de vapeur ; le gain de puissance a par conséquent dépassé 40 % et les chaudières ont eu à débiter moins de vapeur.

Les dispositions de ce genre sont appelées à prendre un grand développement dans les établissements de l'industrie textile, filatures et tissages ; elles conduiront à une électrification partielle extrêmement féconde en résultats de tout genre.

Une électrification générale, obtenue par l'emploi unique de groupes électrogènes, est une application des turbo-moteurs plus radicale, restée assez restreinte jusqu'ici, qu'il n'y a guère de raisons d'étendre beaucoup. A mon avis, — je reconnais que ce n'est pas l'avis de tous, — cette extension n'est à conseiller que dans des cas particuliers, notamment quand il y a à transporter de l'énergie dans un rayon considérable, ou à travers des espaces et des terrains dont on ne dispose pas en maître, quand la marche de certaines machines (des métiers à tisser, par exemple) subit des intermittences fréquentes, quand leur installation exige de longues lignes d'arbres, ou bien encore lorsqu'on opère des dérivations sous haute pression et qu'on a l'utilisation d'eaux chaudes sans huiles, que ne peuvent donner les moteurs à piston, etc. Hors de ces cas, et de quelques autres analogues, il faut se garder de céder à un engouement irréfléchi pour l'électricité, qui rend d'incomparables services, c'est entendu, mais les fait payer ; il ne faut point oublier qu'en général l'attaque directe des transmissions par les câbles et courroies, qui ont remplacé partout les roues dentées, est plus économique que la commande électrique, laquelle exige deux transformations successives, d'énergie mécanique en énergie électrique et réciproquement, et de plus une perte en ligne, que l'on peut assurément rendre aussi faible que l'on veut, mais qui n'est jamais

négligeable. Dans des conditions de rendement que l'on peut dire très satisfaisantes, l'utilisation totale reste voisine de $0,92 \times 0,92 \times 0,975 = 0,825$: or, un transport mécanique d'énergie donne souvent 0,94. Je pourrais citer des chiffres précis, que j'ai relevés, avant et après électrification, dans d'importantes usines, dans lesquelles une transformation par voie électrique, avantageuse à certains égards, s'était soldée en fin d'année par une dépense plus grande de combustible. Les grandes cages à câbles ont encore et garderont de nombreux et fidèles clients.

Ajoutons d'autre part que le turbomoteur, considéré uniquement comme source d'énergie, n'a point de supériorité théorique sur la machine alternative à piston ; j'ai montré qu'on ne peut revendiquer en sa faveur que des avantages ressortissant de la théorie générique telle que Hirn l'entendait, à savoir une réduction des actions nuisibles de paroi et des pertes par espace nuisible et détente incomplète ; il ignore le déchet de rankinisation et des chutes de pression inopérantes ; ce sont là des facteurs de grande valeur, mais dont on a peut-être voulu exagérer la portée¹. Si la détente se poursuit mieux et plus loin dans la partie basse-pression d'une turbine que dans le deuxième cylindre d'une compound, par contre le premier cylindre de celle-

1. WITZ : Théorie générique et expérimentale des turbines à vapeur et à gaz ; *Revue générale des Sciences*, 15 et 30 janvier 1908.

ci présente un rendement meilleur que les roues haute-pression. En somme, la machine à piston garde sa valeur relative : la pratique confirme cette manière de voir. Dans une série d'essais de onze turbines d'une puissance variant de 300 à 2.500 kilowatts, effectués chez l'industriel, par M. Kammerer, en l'année 1912, cet ingénieur distingué a trouvé pour une d'elles une consommation de 12,23 kg. de vapeur par kilowatt-heure, dont je ne ferai pas état, car la vapeur n'était pas surchauffée ; pour les dix autres, la dépense a passé de 8,93 à 6,60 kg., ce qui correspond à 5,90 et 4,36 par cheval-heure effectif, et pourrait se ramener à 5,31 et 3,92 par cheval-heure indiqué, si l'on voulait trouver une base de comparaison avec les consommations signalées ci-dessus¹. Ce sont des grandeurs de même espèce.

Au delà de 2.500 kilowatts, le rendement s'améliore sensiblement et l'on a signalé fréquemment des consommations de 5,50 kg. de vapeur par kwh dans les conditions habituelles des centrales, soit 12 kg. de pression à l'entrée des turbines, et 300° à 310° de surchauffe, marche à pleine charge de turbines d'au moins 500 kilowatts. Le perfectionnement des génératrices a

1. La puissance indiquée n'a aucun sens, ni aucune réalité en turbines ; il n'en est fait usage que dans le but de pouvoir comparer leurs consommations avec celles des machines à piston dont la puissance est toujours mesurée par l'indicateur de Watt. Mais on peut calculer assez exactement les résistances passives d'une turbine et déterminer son rendement organique.

évidemment contribué aux améliorations constatées dans la dépense de vapeur par unité de puissance. Mais il faut reconnaître que les constructeurs de turbines ont réalisé de sérieux progrès par un meilleur profil des ailettes et directrices, une réduction des jeux, un meilleur isolement calorifique des enveloppes et une augmentation du vide. Le condenseur Westinghouse-Leblanc et l'éjecteur Bréguet-Delaporte conduisent aujourd'hui à des vides de 96 %, inconnus il y a peu d'années : on était alors heureux d'atteindre 90 à 92 %.

Les Américains ont pris, semble-t-il, la tête du mouvement en turbines ; au Congrès de 1918 de l'American Institute of Electrical Engineers ¹, M. Rice a mis en relief dans le parallèle ci-dessous l'amélioration des rendements obtenue chez eux depuis 1903, date de l'installation aux Etats-Unis du premier groupe turbo de 5.000 kilowatts :

Années	Puissance des unités	Rendement thermique global en pour 100
1903	5.000 kw.	10,15
1908	14.000	15
1913	20.000	18
1917-18	35.000	21,6.

Ce rendement de 21,6 est encore largement dépassé par celui des puissants moteurs à gaz

1. Voir le discours de M. Rice dans la *Revue gén. des Sciences* du 15 octobre 1918 ; et dans la *Revue gén. d'Electricité* du 15 déc. 1917 d'intéressants rapprochements entre les turbines de 1911 et de 1915, dans une étude de M. Lehoux.

de hauts fourneaux et par les moteurs Diesel ; mais la turbine possède sur ces machines motrices une prééminence indiscutable, qu'elle doit à son volume réduit, au faible encombrement qu'elle présente, aux frais minimes d'entretien et de graissage qu'elle impose même en surchauffe, à la régularité de sa marche, et à la souplesse et à la sécurité de son fonctionnement. Ce sont des qualités maîtresses, qui lui permettent de se prêter mieux que tout autre à la commande directe des génératrices de courant, des ventilateurs et des pompes. De plus, elle règne en souveraine dans les stations centrales où elle a atteint des puissances formidables, que les machines à piston, quelles qu'elles soient, ne peuvent égaler qu'en multipliant les unités, en occupant de vastes espaces et en augmentant énormément les frais d'installation et d'entretien.

*
* *

La machine à air chaud, inventée dès 1816 par le révérend Stirling, introduite plus tard dans la pratique industrielle par le capitaine Ericsson, qui avait fait concevoir tant d'espérances, fondées d'abord sur l'argument assez vain de l'absence de chaleur latente, ensuite sur la chute considérable de température entre les sources supérieure et inférieure, et enfin sur le rendement générique de son cycle, pouvant devenir égal à un, ne survit plus guère que dans les

souvenirs des thermodynamistes ; les régénérateurs n'étaient qu'un rêve ! Ils ne régénèrent pas la chaleur ou, s'ils en régénèrent quelque peu, ils ne durent pas.

Par contre, le moteur à gaz tonnants, sorti de la période des tâtonnements par l'initiative de Lenoir, en 1860, a parcouru en peu d'années une carrière magnifique, et il s'est posé en rival heureux de la machine à vapeur, avec ses unités de plusieurs milliers de chevaux, alimentées par ces puissants gazogènes que sont les fours à coke et les hauts fourneaux. Des expériences très soignées que j'ai poursuivies sur un de ces moteurs, de 2.200 chevaux effectifs, m'ont conduit à relever une consommation de 2.380 litres de gaz à 944 calories, par cheval-heure effectif, donc de 2.247 calories ; le rendement thermique effectif moyen de cinq essais a été de 0,28, valeur à remarquer ; le rendement générique, que l'on peut estimer à 0,38, est moins élevé que celui des bonnes machines à vapeur, parce que le cycle réel du moteur présente plus d'imperfections. Il reste donc plus de progrès à faire en moteurs à gaz et il y a pour eux une plus grande marge d'avenir : ils contribueront efficacement à l'économie du combustible.

Toutefois ce n'est pas en développant plus encore leur puissance que l'on réalisera la plus importante économie de calories, attendu que le plus beau rendement thermique qu'il m'ait été donné d'observer, égal à 0,298 (autant vaut dire

0,30), a été atteint par un moteur de 16 chevaux, alimenté de gaz de ville, d'un pouvoir calorifique considérable de 5.784 calories (pouvoir supérieur). Je ne crois pas davantage à l'avenir des turbines à gaz, sur lesquelles quelques-uns ont fondé tant de brillants projets : leur réalisation présentera du reste d'énormes difficultés pratiques.

Dans de nombreuses industries, le moteur à gaz pauvre se prête directement à de substantielles économies, car il développe couramment le cheval-heure effectif par 400 ou 450 grammes d'un charbon, que j'estimerai à 8.000 calories, pour ne pas faire la part trop belle au gazogène, qui exige un charbon de choix et exclut l'emploi de poussières, pour assurer un fonctionnement sûr et une marche élastique. On a exagéré les pertes occasionnées par les charges réduites. D'autre part, on n'a pas tenu compte des récupérations de calories que l'on réalise en montant des chaudières sur l'échappement des moteurs : je sais des installations qui ont ainsi fourni 800 grammes de vapeur saturée sous 7 kg. de pression par cheval-heure, en créant une disponibilité supplémentaire et gratuite de près de 10 % de la puissance du moteur.

Ce qui précède s'applique surtout aux établissements de grandeur moyenne, mais le domaine du moteur à gaz est bien plus étendu ; son rôle est beaucoup plus considérable en métallurgie, où il a sa place marquée à côté des fours à coke et des hauts fourneaux ; il n'y redoute

pas la concurrence des turbines à vapeur, tant que l'on n'aborde pas les unités de très grande puissance, de 4.000 kilowatts et plus. Cette question conduirait à des développements que le manque de place m'empêche de donner ici, mais dont l'extrême importance n'échappera pas à mes lecteurs.

Les ardents promoteurs des procédés de gazéification des combustibles, dont j'ai déjà exposé les vastes projets et les non moins vastes espérances, escomptent ces rendements des moteurs à gaz, riches et pauvres, avec trop d'optimisme peut-être, mais non sans fondement, et nous nous rangerions plus résolument parmi eux, s'ils savaient se borner et ne pas vouloir faire trop vite et trop grand.

Le moteur Diesellieur fournit, d'autre part, un de leurs plus solides arguments, avec ses rendements thermiques extraordinaires de 33,4, correspondants à une dépense de 190 gr. d'un combustible liquide possédant un pouvoir supérieur de 10.000 calories au kilog. : on a même obtenu en Suède un rendement de 36,8 $\frac{0}{10}$ par 173 gr. de mazout américain. Mais il n'est pas besoin de faire état de semblables coefficients d'utilisation pour établir la possibilité d'énormes économies de calories à réaliser par les moteurs Diesel; l'exemple souvent cité, non démenti, de la station de Chelsea est caractéristique : l'emploi des machines à combustion interne a conduit à une consommation de 700 tonnes d'huile pour un

service qui coûtait 6.000 tonnes de charbon brûlé sous des chaudières¹.

Il y a là une voie largement ouverte à des progrès considérables, dans laquelle la France s'est laissée devancer. Peu de temps avant sa fin tragique, Diesel exposait à l'*Association of Mechanical Engineers*, le 15 mars 1911, que les Allemands étaient en mesure de produire assez de combustibles liquides pour fournir 5 milliards de chevaux-heures, soit 1.750.000 chevaux pendant 300 journées de 10 heures ; la production de l'Angleterre n'était pas moindre. En 1914, nous développiions environ 60.000 chevaux par moteurs Diesel : l'Allemagne disposait alors de plus d'un million de chevaux, qu'elle alimentait surtout d'huiles de goudron, dont le prix se tenait aux environs de 6 francs les 100 kg. : nous les payions au moins 8 francs et la qualité de nos produits était généralement inférieure à ceux que nous pouvions faire venir d'Outre-Rhin. Nos usines à gaz, nos fours à coke, nos appareils de traitement des tourbès et des lignites, nos gazogènes à récupération, les établissements où l'on travaille nos huiles de schiste, etc., doivent intensifier leur travail et perfectionner leurs procédés pour regagner l'avance qu'ont prise sur nous des pays, pourtant plus riches en houille que nous ne le sommes, qui auraient moins

1. Je néglige ici de parti pris les prix de la calorie, qui réduisent les bénéfices à réaliser : voir sur ce point mon travail sur la crise de la machine à vapeur, déjà cité.

besoin que nous de suppléer à ce qui nous manque en matières combustibles. Le génie créateur, l'initiative éclairée et l'activité que les échecs ne rebutent pas, ces vertus de la vieille race française, ne sont-elles plus que de vains mots et des souvenirs d'un passé glorieux ?

*
* *

L'électricité est une forme supérieure de l'énergie : elle se prête admirablement à des applications multiples et variées, en vertu même de la supériorité de sa forme ; elle se transporte au loin avec des pertes qu'on réduit à volonté en augmentant sa tension et la section de ses conduites, et se distribue partout en se répartissant suivant la demande. Une industrie nouvelle est née qui a pour objet de produire cette énergie et de la fournir aux industries qui l'utilisent en tous les points du territoire, se mettant à leur disposition de jour et de nuit comme un serviteur docile et fidèle, qui ne se refuse jamais au travail tant que celui-ci ne dépasse point ses forces.

Des réseaux serrés de canalisations couvrent de vastes régions industrielles, soit en rayonnant autour d'une centrale unique, entièrement consacrée à la génération du courant et construite dans ce but spécial, soit en englobant un certain nombre d'établissements, qui produisent de l'électricité pour leurs besoins particuliers, mais n'utilisent pas toutes leurs disponibilités respectives et sont à même d'en céder. Il se forme de la

sorte d'importants groupements, qui mettent des kilowatts-heures à la disposition de ceux qui en demandent, jugeant plus intéressant d'en acheter que d'en fabriquer. De semblables réseaux étaient constitués partout avant la guerre, en Suède et Norvège, en Suisse, dans l'Italie du Nord, qui distribuaient surtout l'énergie de leurs chutes de montagnes; dans les contrées moins favorisées à cet égard, on avait construit des stations thermiques, dans le Durham et le Northumberland, dans le bassin Rhénan-Westphalien, dans les pays de la Sarre, de Liège, de Charleroi, etc. La France avait suivi le mouvement, en constituant les groupes du Nord et du Pas-de-Calais, de la Lorraine, de la banlieue parisienne, du Lyonnais, de la Loire, de la région des Alpes et des Pyrénées¹. Les Américains de la grande république des États-Unis, coutumiers des entreprises hardies et des grandioses réalisations, avaient organisé les lignes des Grands Rapides, de Battle Creek, du Niagara, de Los Angeles, etc., et bien d'autres pour lesquelles ils avaient résolument adopté des tensions de 60.000, 100.000 et 150.000 volts, qui vont être portées à 180.000 volts. Leurs centrales de New-York, Chicago, Philadelphie, Détroit ont été décrites par M. Sos-

1. Ce sujet ne peut qu'être effleuré dans cette étude; pour de plus amples données, on se reportera avec fruit aux ouvrages suivants : COURTOY : Production économique de l'électricité dans les régions industrielles (Paris, Béranger, 1919); — BOILEAU : Production et vente de l'énergie électrique (Paris, Dunod et Pinat, 1919).

nowski au retour de sa mission ; elles méritent le nom de supercentrales, qui paraît avoir été créé pour elles, avec leurs capacités de 240.000 kilowatts, leurs unités électrogènes de 10.000, 20.000, 35.000 (on parle même de 50.000 kw.), leurs générateurs vaporisant 60.000 kg. d'eau à l'heure, et le reste à l'avenant. Des stations hydrauliques se marient avec les stations thermiques et leur apportent le concours de leurs turbines d'une puissance unitaire de 20.000 kw. et plus, qui collaborent avec les turbo-moteurs au même objectif commun, qui est de desservir une clientèle aux besoins divers.

Maintenant que la victoire des Alliés paraît avoir donné au monde des espérances durables de paix sous l'égide et l'œil vigilant de la Société des Nations, ces centrales et ces réseaux vont se développer, croître et se multiplier partout. De vastes projets ont été conçus en tous pays, et l'Allemagne elle-même, vaincue par les armes, mais dont la puissance industrielle n'est pas brisée, va relier ses ports de la Baltique aux stations hydro-électriques de la Bavière, de la Saxe et de la Suisse.

Mais ne nous occupons que de la France.

Pauvres, mais non dénués de houille noire, de tourbe et de lignite, voire même d'huiles combustibles provenant de sources diverses, largement pourvus de houilles blanche, verte et bleue, nous avons le devoir de grouper nos stations de montagne, de plaine et de rivage, nos stations

thermiques proprement dites, celles qui se sont constituées autour des mines de charbon, des tourbières, des fours à coke et des établissements sidérurgiques en un vaste réseau national, auquel l'Etat prêtera son concours en laissant une entière liberté à l'initiative des sociétés et des particuliers, que stimulera suffisamment le soin de leurs intérêts. De grandes routes électriques seront ouvertes à travers le pays, sur le bord desquelles s'édifieront les usines les plus diverses. L'unification s'imposera, mais elle ne se bornera pas aux voltages et aux fréquences ; l'unité se réalisera dans les principes et les méthodes d'exploitation, sous la forme d'une « harmonie de puissances libres et autonomes » suivant la formule du grand Leibniz ; une fédération des producteurs formera une république où chacun gardera une personnalité indépendante, animée d'un double souci, le souci généreux du bien de la collectivité et celui non moins légitime de l'intérêt privé. Une association, implicitement constituée entre les producteurs de courant et ceux qui l'emploient, conduira à une amélioration dans l'utilisation des puissances génératrices, autant par la combinaison rationnelle des moyens d'action des uns que par la variété des besoins des autres, devenus leurs clients ; un facteur considérable interviendra, le temps, se traduisant par une élévation des coefficients de charge, de diversité et de puissance. Les génératrices travailleront à plein collier le

plus d'heures possible sur les 24 de la journée, le plus de journées possible sur les 7 de la semaine, la septième étant consacrée plus spécialement aux industries qui ne connaissent pas le repos hebdomadaire; au cours des saisons successives, les chutes d'eau au régime glaciaire prêteront leur concours ou recevront en retour celui des chutes au régime pluvial; les périodes de plus grande action d'une industrie suppléeront à celles de moindre action d'une autre; le chauffage et l'éclairage se succéderont, le premier recevant au besoin du courant dénaturé, c'est-à-dire interrompu par saccades, pour éviter les canalisations spéciales tout en permettant de lui appliquer un tarif réduit; l'agriculture compensera ses travaux des champs de l'été par ceux de l'intérieur en hiver; l'électrochimie enfin absorbera en tout temps les excédents éventuels de production momentanée pour ses fabrications de nitrates, de carbures, d'explosifs, de soie artificielle, de caoutchouc synthétique. En un mot, l'ancien concept du rendement s'élargira; il ne se limitera plus à une considération étroite de rapport entre les valeurs instantanées de l'énergie potentielle disponible et de l'énergie actualisée sous la forme électrique d'abord et puis sous les autres ensuite. Ce qu'on mettra en parallèle, ce sera l'énergie engendrée et totalisée au cours d'une année entière dans les stations avec celle qui sera appliquée à des travaux utiles durant le même temps. Il en résultera nécessairement pour le pays une

économie de charbon. Quelle sera-t-elle ? Nul ne saurait chiffrer les millions de tonnes que nous consommerons en moins annuellement, mais le bénéfice est certain; il sera d'autant plus considérable qu'une technique plus éclairée et un esprit plus pratique auront présidé à l'organisation de cet harmonieux ensemble. Nous sommes à même de le réaliser dès demain. C'est à cela qu'il faut consacrer tous nos efforts.

On développera d'abord les puissances dont nous possédons surabondamment les éléments et qui ne demandent qu'à être recueillies, les puissances hydrauliques : elles sont doublement précieuses en ce temps de pénurie, où nos mines dévastées et inondées ne sont pas encore reconstituées, et où les bras se croisent ou se refusent, au lieu de travailler. Le Soleil et la pesanteur ne font jamais grève. Durant la guerre, un grand pas a été fait dans cette voie : il faut en faire d'autres.

Notre sidérurgie française, grâce à la réannexion de la Lorraine, produira désormais 7 millions de tonnes de fontes et d'aciers annuellement¹; or, chaque tonne fournit 400 m³ de gaz à 950 calories; sur un million de ces m³, 350.000 vont aux Cowper et 250.000 aux soufflantes; le reste alimente des moteurs, dont les machines des aciéries absorbent une partie de la puissance, mais en laisseront une disponibilité considérable pour

1. WIRZ : Les ressources industrielles de l'Alsace-Lorraine ; *La Technique moderne*, mai 1919, page 235.

le réseau. L'Allemagne nous avait devancés sur ce point : prenons exemple sur ce qu'elle avait fait dans les pays qu'elle nous a restitués. Les établissements de Rombas distribuaient du courant par leur ligne de Sainte-Marie-au-Chêne, en vendaient à la Thyssen-Grube et desservait la ville de Metz, pour lumière et énergie, à bas prix; Huckange, Fenetrange, Alsdorff, Hayange, Patural, Thionville, etc., étaient devenus de même des centres de production : toutes ces usines sont à notre service désormais. De grands exemples nous viennent aussi de nos alliés d'Amérique : la seule aciérie de l'Illinois Steel Company dispose de 250.000 kilowatts par moteurs à gaz de fourneaux : voilà les vraies centrales à gaz !

Nos fours à coke du Nord et du Pas-de-Calais reconstruits coopéreront d'autre part avec tous ceux du pays, et nous aurons encore des millions de mètres cubes d'un gaz relativement riche à utiliser directement en moteurs. L'éminent directeur des mines de Lens, M. Cuvelette, estimait en 1909, à deux millions de chevaux la puissance que représentent les fours à coke d'Europe¹ ; le contingent français peut être estimé aujourd'hui à plusieurs centaines de mille chevaux, dont la moitié pourra aller au réseau national.

Les stations thermiques spécialisées formeront

1. CUVELETTE : L'utilisation directe du gaz de four à coke dans les moteurs à gaz; *Mémoires de la Société des Ingénieurs civils*, février 1909.

l'élément élastique de ce consortium des fabricants d'électricité, associés pour desservir les besoins du pays; elles en prendront la direction et assumeront la mission de maintenir toujours l'équilibre entre l'offre et la demande, en suppléant aux déficits d'une part et en intervenant d'autre part aux heures de pointe. Elles seront spécialement organisées à cet effet, et disposeront des unités nécessaires pour les faire travailler toujours à pleine charge, de manière à leur assurer un bon rendement; on cherchera avant tout à les installer sur le carreau des mines, ou du moins sur des voies ferrées et des canaux y aboutissant directement. C'est ainsi qu'on réussira à employer avantageusement des combustibles de valeur moindre, produits délaissés et déchets, ne supportant pas les charges d'un transport: on prendra pour types les mines-usines, si heureusement réalisées en Westphalie et dans la région rhénane. Ces centrales devront être puissantes, afin de réduire le prix du kilowatt installé, lequel diminue sensiblement avec l'importance des établissements; pour un équipement en vapeur, on estime qu'en passant de 3.000 à 30.000 kilowatts, on divise par 2 l'ensemble des frais de construction par unité¹. Il faudra rompre avec une tendance qui tendait à prévaloir autrefois, alors qu'on s'efforçait de réduire

1. Dans ces appréciations, il n'est évidemment tenu aucun compte des lignes et de leur prix; il ne s'agit que du k. w. qui peut être débité aux bornes de l'usine.

au minimum le capital investi, au risque de dépenser plus de combustible. On raisonnait mal, attendu que le coût du charbon brûlé a toujours dépassé l'ensemble des frais généraux, intérêt et amortissement des capitaux y compris; c'était vrai avant la guerre, ce l'est bien plus aujourd'hui, où la charge provenant du combustible prime toutes les autres, dans une proportion chaque jour grandissante, et où notre premier souci doit être de consommer le moins de combustible possible.

L'idéal d'une centrale thermique doit donc être d'utiliser le combustible dans les conditions de la plus stricte économie, tout en s'assurant une grande sécurité et une extrême souplesse de fonctionnement. Ce principe posé, quel est le véhicule du calorique auquel il conviendra de donner la préférence. Emploiera-t-on les moteurs à vapeur, à gaz ou bien à huiles lourdes?

C'est ici que devrait, semble-t-il, le mieux trouver sa place le procédé dont M. Métivier nous a présenté le séduisant programme, dans cette industrie spéciale ayant « l'indépendance thermique nationale comme but et la carbonisation de la houille comme moyen »; je l'ai déjà étudié ci-dessus. L'argument principal de la thèse repose sur le rendement prééminent des moteurs à gaz et des moteurs Diesel. On créerait sur une échelle inusitée jusqu'ici, dans le style le plus moderne, et par suite le plus parfait, d'immenses usines à gaz, dotées des meilleurs appareils

de distillation de la houille, de récupération des sous-produits et de gazéification du coke, et l'on y adjoindrait les machines thermiques les plus remarquables par la manière dont elles transforment en énergie mécanique et électrique l'énergie calorifique des gaz, des essences et des huiles combustibles tirés du charbon ; on constituerait donc de colossales cokeries, desquelles il ne sortirait pas de coke, mais uniquement des kilowatts-heures destinés au réseau national. Le résultat final serait de nous faire gagner plus de 32 %, a-t-on dit, sur notre consommation annuelle de houille : dans une étude très nourrie, que j'ai déjà signalée, M. Joulot établit même la possibilité d'une économie de 37 0/0, avec un bénéfice supplémentaire apporté par la vente de certains sous-produits, s'élevant à 25 0/0 des capitaux engagés dans l'entreprise. Pour achever de convaincre ceux pour lesquels les devis et bilans de ce genre n'ont pas toute l'éloquence que d'autres leur prêtent, cet ingénieur cite l'exemple vécu de la Société des Houillères de Montrambert, qui a monté une installation développant 550 kilowatts : il termine en formant le vœu de voir cet exemple suivi.

Nous nous associons entièrement à ce vœu.

Ce qui a été fait à Montrambert avait du reste été déjà réalisé, avant la guerre, par la Société des mines de Lens, à la station de Vendin-le-Vieil, où deux batteries de 70 fours à coke, du système Kofpers, alimentaient trois moteurs à

gaz d'une puissance individuelle de 1.200 chevaux effectifs ; l'installation était destinée à être doublée. Au témoignage de M. Cuvelette, les résultats obtenus avaient été pleinement satisfaisants ; le kilowatt-heure était ressorti au même prix par les moteurs à gaz que par des turbomoteurs à vapeur, mais on avait produit une puissance double avec la même quantité de gaz : cette seule considération constitue un argument de grande valeur en faveur de l'emploi des moteurs à gaz. Il convient toutefois de ne pas s'arrêter à ce premier résultat et d'étudier plus complètement cette station de Vendin-le-Vieil. Les moteurs à gaz y étaient constamment maintenus à pleine charge, et ils ne se trouvaient exposés ni à des surcharges, ni à des décharges auxquelles ils ne se prêtent pas bien, grâce à l'adjonction de machines à vapeur qui fournissaient les suppléments de puissance nécessités régulièrement ou par à-coups ; la rigidité du fonctionnement des machines à gaz était donc corrigée par l'élasticité des machines à vapeur, qui assumaient les variations imposées par les exigences du service. Cette station se présente par suite à nous comme une station de cokerie mixte, à gaz et à vapeur, fonctionnant en fabrique de coke, de benzols, d'huiles de goudron, etc. Le coke n'y est pas gazéifié, il est employé ou vendu en nature, avec les autres sous-produits. Cette station, comme celle de Montrambert, constitue un type, on pourrait dire un modèle, qu'il y aurait

intérêt à copier et à reproduire, car on trouvera toujours un bénéfice à combiner ainsi les appareils à vapeur et à gaz : rien de plus rationnel, ni de plus élégant; avec des foyers à brûleurs à gaz bien conditionnés et bien conduits, à brûleurs sans flamme, du système Bone, à brûleurs à pétrole et huile de goudrons, appliqués aux chaudières à avant-foyer qui leur conviennent (telles que les chaudières Kestner), on réalise de remarquables rendements de vaporisation et l'on recueille conséquemment les avantages de la vapeur en même temps que ceux des gaz. On ne devait disposer à Vendin encore que de 7.200 chevaux, mais rien n'empêchera de monter à une puissance double ou triple et d'organiser une usine remarquable, qu'on branchera comme auxiliaire sur le réseau général, auquel elle passera ses excédents.

Mais les projets que l'on a conçus sont d'une plus vaste envergure. Il s'agirait de transformer toute l'énergie potentielle du charbon en énergie électrique et de n'en sortir que des kilowatts : les hauts rendements des moteurs alimentés de gaz de distillation de fours, de gaz de gazéification de gazogène, et de combustibles liquides, brûlant en combustion interne, sont la justification du procédé que l'on se propose d'appliquer en grand, et duquel on attend des résultats remarquables.

Les immenses stations ainsi constituées posséderont-elles la sécurité et la souplesse de

fonctionnement sur lesquelles on doit pouvoir compter, pour l'alimentation du réseau national ? Ces stations, nécessairement composées d'unités, dont la puissance ne pourra guère dépasser 3.000 kilowatts, présentant donc un grand encombrement, exigeant une épuration parfaite du gaz, offrant d'indéniables difficultés de mise en parallèle, ne rendant le maximum qu'à pleine charge, ne tolérant pas aisément les surcharges, devront-elles être préférées aux grandes stations à turbo-moteurs ?

L'avenir le dira ; nous lui laissons la parole.

*
* *

Le réseau national procurera à de nombreuses industries, répandues en tous les points du territoire, des facilités de vivre, sinon des bénéfices substantiels, qui lui assureront une vaste clientèle, et conduiront à des transformations considérables de certains services.

Parmi ces transformations, l'électrification des voies ferrées figure au premier plan : mise à l'ordre du jour des applications de l'électricité depuis de longues années déjà, essayée non sans succès en Suisse, en Italie, en Suède, en Amérique, et, en France, sur des sections de banlieue, sur des lignes départementales (en Haute-Vienne notamment), et sur quelques tronçons de la Compagnie du Midi, elle n'a encore été étendue nulle part à toute une grande ligne, et il semble qu'elle ne soit pas encore sortie de la période

préliminaire des études et des tâtonnements. Mais elle ne tardera pas à prendre son essor, car elle conduira à une économie certaine et réelle de combustible.

Admirable engin de traction, la locomotive à vapeur est en effet restée médiocre au point de vue spécial du rendement thermique, lequel ne dépasse guère 8 à 10 % ; le compoundage et la surchauffe ne l'ont améliorée que légèrement, malgré tous les efforts des ingénieurs les plus éminents.

Or, la locomotive électrique peut rendre de 20 à 22 %, et elle garde un avantage sensible, tout compte fait des pertes par transmission et par transformation. Elle convient surtout aux lignes à grand trafic et à fortes déclivités ; elle leur donne le maximum de capacité. Elle pèse un tiers de moins que la locomotive à vapeur. Celle-ci consommait au moins 2 kg. 250 de charbon par cheval-heure effectif mesuré au crochet d'attelage et elle ne s'accommodait que de combustibles de choix ; la locomotive électrique, en comptant sur 25 % de pertes de tout genre, conduirait à une dépense moitié moindre de charbon quelconque ; sans rien exagérer, on pourrait donc gagner environ 1 kilo de combustible par cheval-heure.

L'appareil électrique, empruntant son courant à un réseau, alimenté en partie par des stations hydro-électriques, coûtera par suite au pays moins de charbon, à égalité de travail fourni, et

il contribuera à une réduction notable de la consommation totale de nos chemins de fer, qui dépassait 10 millions de tonnes en 1913.

Adoptant les conclusions du rapport que M. Mauduit lui a présenté au retour de son voyage d'étude, la Commission technique pour l'électrification donne la préférence au système du courant continu qui fournit d'excellents résultats sur la ligne américaine Chicago - Milwaukee-Saint-Paul; le triphasé se prête moins bien à la réalisation de la gamme de vitesse, qui facilite les horaires, et présente des difficultés d'équipement des gares et des lignes; le monophasé a un rendement moindre que le continu et conduit à la construction de tracteurs plus lourds; il a de plus le défaut de permettre moins aisément la récupération par freinage, c'est-à-dire la restitution du réseau d'alimentation de l'énergie possédée par les véhicules quand on fait fonctionner les freins.

La commission a fixé à 2.400 volts la traction du courant continu; il serait appliqué sur 8.839 kilomètres de lignes, dont 8.501 sont actuellement en exploitation, sur le versant des Alpes et des Pyrénées, sur le Massif central et à la traversée des Vosges.

On a estimé à première vue la réduction de consommation de charbon, qui résultera de cette transformation, à près de 4 millions de tonnes par an, ce qui n'est pas exagéré; sur une petite ligne de 43 kilomètres, desservie par les centrales

de Soulom et d'Eget, la Compagnie du Midi relevait une économie de 7 tonnes par jour par moteurs à collecteurs monophasés, recevant du courant à basse fréquence, abaissé à 12.000 volts en sous-station; mais on fera beaucoup mieux. La dépense prévue par la Commission atteindrait, il est vrai, 1.675 millions, aux prix d'avant guerre, tout compris, locomotives, lignes de contact et usines: mais elle incomberait en partie à l'établissement du réseau national et la dépense serait répartie sur une vingtaine d'années.

L'électrochimie, qui permettra d'améliorer le coefficient d'utilisation du réseau national, par le travail de nuit, sera un autre client important de la distribution du courant.

La préparation industrielle des corps par réaction électrochimique présente des avantages sur les réactions dans lesquelles interviennent les affinités développées par la chaleur; la mise en œuvre des matières devient plus souple, les déchets diminuent et les rendements croissent en proportion directe.

La production française des carbures, des produits nitreux et chlorés et autres était déjà importante, en 1913; les besoins de la lutte l'ont développée, car il fallut de la cyanamide calcique pour obtenir le nitrate d'ammonium, base des explosifs; on eut besoin de chlorates, pour fabriquer la cheddite, le chlore gazeux, et les gaz de guerre.

De plus, on demandait de l'aluminium, du ferro-silicium, du ferro-molybdène, du ferromanganèse, de la fonte synthétique, des aciers électriques, etc. Toutes ces fabrications, urgentes alors que la France défendait son existence, seront continuées et développées dans les œuvres de la paix : le concours de l'électricité continuera de leur être nécessaire, et il permettra des économies de combustibles de choix.

Le rôle de l'électricité s'accroît du reste chaque jour. Les moulages d'aciers électriques suppriment les recuits en fours. Les hauts fourneaux eux-mêmes bénéficieraient du concours de l'électricité, s'il est permis d'en croire certaines expériences heureuses poursuivies en Suède et en Amérique, d'après lesquelles la consommation du coke se bornerait à ce qui est strictement nécessaire pour les phénomènes de réduction.

Les industries privées de toute nature s'abonneront aux services de distribution et les moindres d'entre elles y trouveront le plus souvent bénéfice. Pour celles qui sont d'une plus grande importance chaque situation devra être étudiée avec soin et sans parti pris, car il y a autant de solutions qu'il se présente de cas particuliers. Il est impossible de donner une formule générale, convenant à la complexité des problèmes qui se présentent. Qu'on me permette de faire remarquer seulement que l'on pose mal la question, en se demandant s'il vaut mieux produire qu'acheter l'énergie

électrique : il faut avant tout examiner si l'on en a besoin. L'énergie électrique n'est qu'un intermédiaire entre l'énergie calorifique et l'énergie mécanique, quand il s'agit de puissance motrice seule ; or, tous les intermédiaires font payer leurs services ; il faut donc s'en passer, si on le peut. Cet intermédiaire s'impose en particulier lorsque le prix de transport du charbon, source de l'énergie calorifique, dépasse considérablement le prix du transport de l'énergie électrique. Il s'impose encore lorsqu'il y a disproportion considérable entre le rendement des installations dont on dispose et celles que réalisent les grandes centrales. Un élément financier intervient d'ailleurs dans la question, celui du prix de vente du kilowatt-heure ; ce prix est fonction du prix du charbon, et on le majore d'habitude de 2 milimes par franc d'augmentation du prix de la tonne ; cette augmentation supposerait par conséquent une consommation de 2 kg. de charbon par kilowatt-heure. L'évaluation n'est pas flatteuse pour les moyens d'action du producteur, et la majoration, appliquée aux cours du jour à partir de la base de 30 francs par tonne, sera très onéreuse pour l'acheteur de courant.

L'extension des stations hydroélectriques permettra d'abaisser le prix du kilowatt-heure ; c'est absolument nécessaire pour gagner des clients au réseau national ; ce n'est possible que si les stations du réseau restent des propriétés privées se gouvernant librement elles-mêmes,

associées sous le contrôle de l'Etat, auquel appartiendra d'unifier les tarifs de vente et de veiller à la conservation et à l'utilisation rationnelle et complète des richesses du pays.

Les pages qui précèdent sont le fruit des réflexions que m'a suggérées la grave pénurie de combustible dont nous souffrons ; cette pénurie a déjà créé chez nous une véritable famine ; et elle met notre industrie en péril.

Le combustible en est l'aliment : il lui est nécessaire, parce que son énergie potentielle se transforme dans les énergies calorifique, mécanique, électrique et chimique qui la font vivre.

Il nous fait défaut au moment où les bras manquent, où les courages défont et où sévit une crise sociale sans précédent. Nous en avons absolument besoin, car la meilleure manière de résoudre les grands problèmes économiques et sociaux de l'heure présente est de développer le plus possible l'emploi des puissances motrices, empruntées à la Nature.

Pour suppléer à la houille, que notre sol ne nous donne pas, il faut intensifier son extraction, si possible, utiliser les succédanés que nous possédons, et développer ses adjuvants. Nous devons d'autre part nous restreindre dans sa consommation, et l'utiliser le mieux qu'il est possible, dans la production de l'énergie calorifique et dans ses transformations diverses.

Tels sont les principaux remèdes à la crise : je

les ai exposés dans leur suite logique en m'efforçant de faire ressortir leur importance relative et de me garder des faux enthousiasmes, provoqués par quelques solutions plus brillantes que réellement efficaces.

Je serais heureux d'avoir contribué dans la plus faible mesure à la solution du problème, qui intéresse la grandeur et l'avenir de la France.

FIN

MUSÉE COMMERCIAL
SECRETARIAT
2, Rue du Commerce
LILLE

TABLE DES MATIÈRES

LA CRISE DU COMBUSTIBLE
ET SES REMÈDES

	Pages
Introduction.....	v
I. — Economies et restrictions.....	1
II. — La Houille, ses succédanés et ses adjuvants.....	27
III. — La meilleure utilisation des combus- tibles.....	71
IV. — L'économie des calories.....	113

Imp. LEVÉ, 1, rue de la Bertauche. — Sens.

