

LA LOCOMOTIVE A VAPEUR MODERNE

L'exposé suivant est extrait d'une conférence très documentée, faite, sous ce titre, devant ses collègues de l'Association régionale des Ingénieurs d'Alsace et de Lorraine, par M. Henri Gilliot, Ingénieur en chef à la Société Alsacienne de Constructions Mécaniques.

Locomotives d'express. — Avec le type Pacific, les Réseaux disposaient d'un engin qui paraissait devoir répondre pendant de longues années à toutes les nécessités du trafic d'express, à gros tonnages. Cependant, dès 1925, l'Est et le P.-L.-M. créèrent presque simultanément un type Mountain, comportant un essieu accouplé de plus que la Pacific. Au P.-L.-M. notamment, qui doit faire franchir à certains moments de la journée des rampes de 8 mm sur 25 à 30 km entre Laroche et Dijon par des groupes de trains se succédant à des intervalles d'une dizaine de minutes, l'avantage de posséder des locomotives capables de reprendre de la vitesse en rampe était d'une importance capitale. Un assez grand nombre de machines de ce type sont actuellement en service sur l'Est, l'Etat et le P.-L.-M., mais les expériences ont dicté une certaine mise au point qui, au P.-L.-M., a conduit notamment à augmenter le diamètre des roues de 1,790 m à 2 m pour pouvoir soutenir de plus grandes vitesses, et à porter le timbre de la chaudière à 20 hpz. La charge par essieu accouplé a atteint 19,700 t; le poids de la machine en service est de 126 t.

Ira-t-on plus loin dans cette multiplication des essieux accouplés pour les locomotives d'express? Cela ne me paraît pas probable dans les conditions d'exploitation de notre pays; en Amérique, par contre, on a déjà dépassé les Mountain en y ajoutant un et même deux essieux accouplés, ce qui donne des accouplements 2-5-1 et 2-6-1.

Ces machines, avec leur empattement considérable, se prêteraient en effet mal à nos tracés de voie assez sinueux, et avec leurs roues relativement petites — encore que 1,700 m pour la machine 2-6-1 de l'Union Pacific soit une dimension très appréciable — ne permettraient plus d'atteindre les grandes vitesses auxquelles nous sommes habitués en France.

Locomotives à marchandises. — Chez nous, l'augmentation du nombre d'essieux accouplés paraît devoir rester réservée aux locomotives destinées à la remorque des lourds trains à marchandises, pour lesquels on emploie actuellement en général des machines Decapod, c'est-à-dire à 5 essieux accouplés et bissel à l'avant. Pour le gros service de triage à parcours assez réduit, on a logé les approvisionnements en eau et en combustible sur la locomotive même, en y ajoutant un bissel à l'arrière, et nous obtenons ainsi le type Santa-Fé 1.5.1.

Ce type existe aussi à tender séparé; une de ses réalisations les plus intéressantes est la machine à 4 cylindres compound que le P.-L.-M. vient de mettre en service où les Mikado 1.4.1. étaient devenues trop faibles. Au lieu de répartir les 4 cylindres sur l'intérieur et l'extérieur du châssis, le P.-L.-M. a disposé ses cylindres BP à l'avant, d'où ils actionnent les 2 premiers

essieux accouplés ; puis viennent les cylindres HP, assez fortement inclinés, qui actionnent les 3 derniers essieux accouplés. Les deux groupes d'essieux sont reliés entre eux par des bielles d'accouplement qui se trouvent, à l'intérieur du châssis, montées sur des essieux coudés, et on en a profité pour réaliser un certain auto-équilibrage des masses alternantes en inversant les points morts des mécanismes d'avant et d'arrière.

Peut-être verrons-nous prochainement sur l'Alsace et la Lorraine une autre réalisation du type Santa-Fé, avec un poids adhérent de 100 tonnes et simple expansion dans trois cylindres.

En Autriche et en Allemagne, on est allé plus loin dans l'accouplement, en ajoutant un essieu accouplé à la Décapod, pour la remorque des trains sur de fortes rampes, telle la fameuse côte de Geisslingen entre Ulm et Augsburg, et en Russie, on vient même de créer un type à 7 essieux accouplés et bissel AV. Comme il a été dit plus haut, l'emploi de pareilles machines demande des lignes sans grandes sinuosités, et restera toujours lié à des conditions exceptionnelles, ne serait-ce qu'à cause de l'accroissement des résistances du mécanisme, qui diminue considérablement l'effort de traction disponible au crochet de la machine pour la remorque du train.

Locomotives articulées (1). — Au cas où les besoins du service exigeraient l'accouplement de plus de 5 essieux, il est probable que, chez nous, on aurait plutôt recours à des locomotives articulées, soit du type Mallet avec lequel on a réalisé aux Etats-Unis, au Northern Pacific, une machine à 2×4 essieux accouplés pesant 325 t, sans le tender qui, avec 80 m³ d'eau, pèse 182 t, — soit du type Garratt, qu'on trouve en usage dans plusieurs colonies anglaises et dont le P.-L.-M. Algérien est également en train de mettre des échantillons en service. La caractéristique principale de la locomotive Garratt est de faire reposer la chaudière par les deux bouts sur les deux extrémités des trucks moteurs, qui peuvent épouser librement les courbes de la voie, et qui portent en même temps les approvisionnements en eau et en charbon ; l'ensemble, comportant ainsi deux tenders, devient évidemment très long. La machine Mallet, par contre, ne se distingue de la locomotive ordinaire que par le fait que le châssis est en deux parties, le truck d'avant pivotant autour d'une charnière fixée à l'avant du châssis AR, sur lequel la chaudière est amarrée de manière rigide, tandis qu'elle transmet une partie de sa charge au truck AV par l'intermédiaire de points d'appui coulissants. Le châssis AR portes les cylindres HP, de sorte que ses conduits de vapeur sont fixes ; les cylindres BP sont montés sur le truck AV, dont la mobilité présente moins de dangers pour l'étanchéité des joints de vapeur à basse pression. Aux Etats-Unis, par contre, les locomotives articulées genre Mallet sont exécutées maintenant à simple expansion. Signalons encore une solution qui évite l'encombrement exagéré de la machine Garratt sans présenter les inconvénients de la machine Mallet, dont la chaudière fixée de façon rigide sur le châssis AR, conduit, en courbes raides, à de très grands déplacements relatifs par rapport au truck AV : la locomotive Golwé (2), dont les trucks ne laissent entre eux que l'espace nécessaire pour laisser plonger le foyer, — de sorte que la poutre portant la chaudière repose sur le centre des trucks, ce qui assure en même temps une meilleure répartition des charges, surtout après épuisement des approvisionnements.

Amélioration du rendement. — Je ne vous ai guère entretenus jusqu'à présent que de l'accroissement de poids, et de la multiplication des essieux accouplés correspondante, qui caractérisent la locomotive moderne et qui ont permis l'augmentation de la puissance par

(1) Voir *Revue Générale*, Nos de Juillet et Août 1929.

(2) Voir *Revue Générale*, N° de Janvier 1930.

l'accroissement de la surface de grille (jusqu'à 17 m² aux Etats-Unis), de la surface de chauffe de la chaudière et des dimensions des cylindres.

Il importe maintenant que je vous donne aussi quelques indications sur les perfectionnements qui ont été apportés à nos locomotives à vapeur, auxquelles de mauvaises langues reprochent d'être encore le même outil, simplement un peu renforcé, que la Rocket de Stephenson. Mais, à la réflexion, cette critique ne serait-elle pas plutôt un éloge pour une machine qui, après 100 ans, n'a pas demandé plus de retouches et reste un chef-d'œuvre de la mécanique, remarquable tant par sa souplesse que par son indépendance ?

Perfectionnement de la chaudière. — En ce qui concerne la chaudière, le principal perfectionnement apporté à la chaudière multitubulaire de Stephenson — dont la priorité devrait revenir à notre compatriote Marc Séguin —, fut l'introduction de la surchauffe. La première application pratique à la locomotive de cette invention à laquelle est lié le nom du savant colmarien Hirn, fut faite par l'ingénieur allemand Wilhelm Schmidt. Après un essai assez infructueux avec un surchauffeur disposé dans un très gros tube de la chaudière, Schmidt passa au surchauffeur logé dans la boîte à fumée, dont un échantillon figura à l'Exposition de 1900 à Paris⁽¹⁾. Mais ce n'est que son troisième type, avec lequel 4 petits tuyaux surchauffeurs étaient disposés dans un certain nombre de gros tubes à fumée, qui donna vraiment de bons résultats. Les petits tuyaux contenant de la vapeur saturée venant d'un collecteur en communication avec le régulateur, y exposaient en double, et plus tard quadruple parcours, ladite vapeur aux gaz chauds, de sorte qu'elle se trouvait finalement surchauffée jusqu'à 300 à 320°.

A noter que ce principe avait été indiqué dès 1850 par deux ingénieurs de l'Est, MM. de Quillacq et Moncheuil, dans un brevet qui ne fut jamais appliqué, mais dont les dessins montrent une ressemblance frappante avec le dispositif réinventé 50 ans plus tard par les Allemands.

Ce genre de surchauffeur est actuellement appliqué à la majorité des locomotives à surchauffe ; seul, le nombre des tubes a été augmenté, afin d'obtenir une surchauffe plus élevée, s'approchant de 400°. Des essais ont aussi fait ressortir l'importance des sections de passage et des surfaces de frottement des gaz pour l'obtention de hautes surchauffes. Pour augmenter la surface de contact de la vapeur avec les gaz, pendant son trajet à contre-courant, l'Est a aplati dans son surchauffeur D. M. les tuyaux de vapeur saturée, qui sont réunis en un seul tuyau de section circulaire pour le retour de la vapeur surchauffée. Un meilleur résultat dans le même sens est cherché par le surchauffeur Houlet, essayé à l'Etat et au P.-O., qui laisse la vapeur saturée s'épanouir en un anneau circulaire. Signalons enfin le surchauffeur Schmidt à petits tubes où les tuyaux surchauffeurs, groupés par 2 au lieu de 4, sont contenus dans des tubes, à fumée d'environ 70 mm de diamètre, ce qui permet d'en loger un plus grand nombre sans réduire la surface de chauffe évaporante, et encore le dispositif qu'on commence à appliquer aux chaudières très longues, dont les gros tubes sont augmentés de diamètre en conséquence et comportent 6 éléments surchauffeurs, à double parcours seulement.

D'autres améliorations à la chaudière ont été cherchées par l'application de voûtes dans le foyer, afin d'assurer une combustion plus complète des gaz, voûtes quelquefois soutenues par des tubes d'eau qui facilitent la circulation autour du foyer et augmentent la vaporisation. A ces tubes d'eau s'apparentent les siphons Nicholson, d'un usage très répandu en Amérique, et où la partie supérieure du tube s'évase en une chambre de grande surface. Notons que l'idée de bouilleurs disposés dans le foyer, tels les Ten-Brink, est très ancienne ; leur résurrection

(1) Voir *Revue Générale*, N^{os} de Septembre 1900, p. 509, et d'Août 1902, p. 169.

sous la forme actuelle est due à la disproportion que l'emploi de foyers larges a créée entre la surface directe du foyer et la surface de grille. D'après des essais qui viennent d'être faits par l'Université d'Illinois, le rendement de la chaudière et la vaporisation se trouvent augmentés d'environ 8 % par les siphons Nicholson.

Pour activer le tirage créé par l'échappement des cylindres moteurs, on a eu recours à des dispositifs d'échappement variable, mais ces dernières années des résultats plus favorables encore ont été obtenus avec l'échappement Kylchap (1), qui divise la colonne de vapeur en 4 jets et assure ainsi une grande surface de contact de la vapeur d'échappement avec les gaz de combustion. On a réalisé ainsi un tirage plus intense sans augmenter la contrepression sur les cylindres, d'où il s'ensuit une augmentation du travail moteur, ou, à puissance égale, une diminution de la consommation de vapeur ; quant au tirage plus intense, il a permis d'allonger les voûtes en briques réfractaires installées dans les foyers, et de réaliser ainsi une combustion plus parfaite, ce qui a procuré une augmentation du rendement thermique de la chaudière de 5 à 15 %.

Pour de grosses chaudières, on applique avec succès deux colonnes d'échappement communiquant chacune avec sa propre cheminée, ce qui, avec le dispositif Kylchap, conduit à diviser la vapeur d'échappement en 8 jets.

Enfin, il y a lieu de mentionner l'application de plus en plus générale de réchauffeurs d'eau d'alimentation (2), qui utilisent une partie de la vapeur d'échappement pour réchauffer l'eau avant son entrée dans la chaudière. Les Allemands utilisent à cet effet le réchauffeur Knorr à condensation par surface, tandis qu'en France ce sont les réchauffeurs par mélange qui sont à l'honneur, avec l'appareil A. G. F. I. reconnaissable à ses deux grosses bouteilles juchées sur la chaudière et que vous trouvez généralisé sur le réseau d'Alsace et de Lorraine qui d'ailleurs a eu le mérite de contribuer à sa mise au point (3), et l'appareil Dabeg surtout employé au P-L-M. et aussi sur l'Etat et dont la pompe forme bloc avec le condenseur. On admet que l'utilisation d'un réchauffeur procure une économie d'environ 8 %.

Signalons aussi l'application, toujours au P.L.M, d'un économiseur Dabeg, comportant une série d'éléments placés dans les gros tubes de la chaudière, en avant des éléments surchauffeurs. L'eau d'alimentation, déjà chauffée à près de 100° dans le réchauffeur, est refoulée avant son introduction dans la chaudière à travers cet économiseur, disposé à un endroit où la chaleur des gaz de combustion est déjà trop réduite pour surchauffer encore d'une manière appréciable la vapeur, mais où elle peut augmenter de 40 à 60° la température de l'eau d'alimentation, qui atteint ainsi 140 à 160°. La Société Dabeg estime que l'emploi de son réchauffeur, doublé d'un économiseur, doit procurer une économie de charbon ou une augmentation de puissance de 15 à 20 % pour des locomotives à pressions normales.

Notons enfin l'augmentation du timbre des chaudières, qui, de 9 à 10 kg en 1878, est passée, grâce aux progrès réalisés par la métallurgie, à 12—14 kg pour les machines à simple expansion et à 15 à 17 kg pour les machines compound. Ces tous derniers temps, l'emploi d'aciers spéciaux au nickel a permis, sans augmenter les épaisseurs de tôles, de monter à 20 hpz ; en Allemagne, on étudie même actuellement une chaudière du type normal qui sera timbrée à 25 kg, avec tôles en acier chrome-molybdène.

(1) Voir *Revue Générale*, Nos d'Août et Septembre 1928.

(2) Voir *Revue Générale*, N° de Février, 1925.

(3) Voir *Revue Générale*, N° de Juin 1925.

Compoundage

La double détente, dont l'avantage essentiel consistait à réduire les pertes d'énergie dues aux échanges de chaleur entre les parois des cylindres et la vapeur, avec condensations et réévaporations successives, permit de réaliser des économies d'eau et de combustible de l'ordre de 15 % par rapport aux machines à vapeur saturée, ou à consommations égales, d'augmenter d'autant la puissance ; elle conduisit aussi rapidement à une augmentation de timbre des chaudières à 15 kg.

L'introduction du compoundage à 4 cylindres eut cependant encore un autre effet : grâce à un certain autoéquilibrage des masses en mouvement alternatif des mécanismes intérieurs et extérieurs, on put supprimer le contrepoids supplémentaire de l'équilibre horizontal, qui présente l'inconvénient de créer un excédent de force centrifuge et d'imposer aux essieux des surcharges périodiques qu'on limite ordinairement à environ 15 % de la charge statique sur rail. Cette charge qui, à cette époque, était généralement prise égale à 14 ou 14,5 t par essieu pour tenir compte des dites surcharges périodiques, put donc être portée sans inconvénients pour les locomotives à 4 cylindres, à 16 t. J'ajouterai que ces dernières années, des relèvements sérieux ont été décidés sur différents réseaux français : à l'A.L. au P-L-M, les charges admissibles ont été fixées à 20 t par essieu, au Nord on envisage même 22 t. Nous sommes évidemment encore loin des charges admises aux Etats-Unis, et qui vont de 28 t au New-York Central à 34 t au Pennsylvania, et même à 37, 5 et 39 t. A noter que ces dernières sont obtenues moins par un renforcement des rails que par un plus grand rapprochement des traverses en bois qui les supportent.

Parmi les autres avantages de la locomotive compound à 4 cylindres, nous citerons encore la moindre fatigue des organes moteurs, la moindre pression sur les tiroirs BP maintenus plans et donc plus étanches que les tiroirs cylindriques auxquels on dut avoir recours pour les cylindres HP, notamment après l'introduction de la surchauffe ; la meilleure utilisation des espaces morts et le moment moteur plus constant.

Néanmoins, l'application de la surchauffe, avec sa supériorité thermique incontestable et les économies d'eau et de charbon qu'elle permit de réaliser, souleva rapidement la question de savoir s'il restait intéressant de conserver le compoundage à 4 cylindres, malgré sa complication des 4 attirails moteurs, et notamment de l'essieu coudé actionné par les cylindres intérieurs, qui est d'un entretien très coûteux.

Cette question fut très controversée ; les Belges, les Allemands, l'Angleterre, les États-Unis, abandonnèrent en général le compoundage, mais les réseaux français se rallièrent plutôt à la superposition, des essais faits à l'époque avec des types similaires de locomotives compound et non-compound à surchauffe ayant laissé un certain avantage aux premières⁽¹⁾. Ces conclusions furent aussi confirmées par des essais faits en Russie de 1913 à 1916 par le professeur Lomonosoff. Tout en admettant en effet qu'avec une surchauffe suffisante il ne se produit pas de condensation sur les parois des cylindres, il n'en reste pas moins que la vapeur diminue de volume du fait de son refroidissement pendant la période d'admission, et qu'elle provoque ainsi une réaspiration de vapeur fraîche, d'où il résulte une consommation supplémentaire de vapeur. Au point de vue thermique, il y a donc intérêt à avoir le moins d'écart possible de température dans un cylindre, et donc à travailler en double détente. A cette raison s'ajoute le manque d'étanchéité des tiroirs cylindriques HP ; avec une machine compound, les fuites de vapeur ne sont pas

(1) Voir *Revue Générale*, N° d'Avril 1931.

complètement perdues, car elles fournissent encore du travail dans les cylindres BP, tandis qu'avec la machine à simple expansion, elles s'échappent directement par la cheminée.

Ces tous derniers temps, une confirmation éclatante des avantages du compoundage vient d'être apportée par des essais faits au P.O. sur une machine Pacific de 1913, la 3566, transformée par les soins de la Compagnie en 1929 (1). Un sérieux reproche que l'on pouvait faire à beaucoup de locomotives compound, était que les cylindres BP ne fournissaient que très peu de travail. Avec une locomotive de la série non transformée, la puissance développée par les cylindres BP n'atteignait ainsi, à 26 % d'admission HP, que 60 chevaux, alors que les cylindres HP en donnaient 930, soit 15 1/2 fois plus. Aux admissions plus élevées, la situation s'améliorait, il est vrai, mais la disproportion était cependant encore de l'ordre de 1 à 4. Or, après transformation, la puissance développée par les cylindres BP atteignit dans le premier cas 564 ch, c'est-à-dire 60 % de la puissance HP, et à 53 % d'admission aux cylindres HP, même l'égalité de travail entre les deux groupes de cylindres. La puissance de la locomotive se trouva ainsi accrue de 50 %, passant de 2 000 ch indiqués à 3 000 ; on atteignit une vitesse soutenue de 120 km/h, et on diminua les consommations d'eau et de combustible. La transformation avait consisté essentiellement en un meilleur aménagement des circuits de vapeur en vue d'éviter les pertes de charges, le remplacement des tiroirs de distribution par des soupapes à doubles sièges et de très grandes dimensions en vue de supprimer les pertes par laminage et les contrepressions aux cylindres, le renforcement de la surchauffe, l'adjonction de siphons Nicholson dans le foyer pour augmenter la vaporisation, enfin l'application d'un échappement double Kylchap et l'addition d'un réchauffeur d'eau d'alimentation. Ce qu'il est particulièrement intéressant de relever, c'est que l'augmentation du travail des cylindres BP a été réalisée sans que le travail des cylindres HP s'en soit trouvé diminué, malgré l'accroissement de la contrepression créée à l'échappement de ces cylindres, fait obtenu essentiellement par la réduction de la chute de pression entre la chaudière et les boîtes à vapeur HP, et celle des pertes par laminages aux tiroirs.

Les résultats remarquables de cette transformation ont conduit le P.O. à l'étendre à un lot de 20 autres machines, en augmentant encore le diamètre des soupapes d'admission BP et en appliquant un surchauffeur Houlet à nappe annulaire, tout en portant le timbre de la chaudière à 17 hpz. Il en est résulté une nouvelle augmentation de puissance de 10 % et une économie de 5 % par rapport à la machine d'essai. Entre Bordeaux et les Aubrais, soit 460 km, le Sud-Express, train léger de 230 à 350 t, a réussi ainsi à économiser cet été près d'une heure ; un rapide très lourd, avec plus de 700 t regagne normalement 12 minutes sur le temps alloué de 1 h. 17 pour le trajet de 112 km de St-Pierre-des-Corps aux Aubrais.

Distribution par soupapes. — Parmi les innovations qui ont conduit à cette régénération surprenante, nous devons une mention spéciale à la distribution par soupapes. Ce genre de distribution avait été appliqué dès le début du siècle en Allemagne, par Lentz (2), mais avait donné lieu à beaucoup de déboires, dûs surtout à la difficulté de créer des soupapes assez résistantes aux vitesses auxquelles elles doivent fonctionner. Ce n'est que ces dernières années qu'on a réussi à résoudre le problème, grâce aux progrès réalisés, dans la fabrication des aciers spéciaux. A titre documentaire, l'acier employé pour les soupapes d'admission de la locomotive du P.O., comporte de 20 à 25 % de nickel et 10 % de chrome, donnant à la fois une charge de rupture et des allongements élevés ($R = 80 \text{ kg/mm}^2$, $A = 25 \%$).

L'avantage des distributions par soupapes sur les distributions par tiroirs consiste d'abord à

(1) Voir *Revue Générale*, N° de Juillet 1931.

(2) Voir *Revue Générale*, N° de Mars 1907.

permettre des surchauffes élevées, auxquelles les tiroirs présentent des difficultés de graissage, mais surtout à assurer de bonnes sections de passage à la vapeur, en évitant par là les pertes par laminage à l'admission et les contrepressions à l'échappement qui, en dehors de la diminution de rendement du moteur, brident les machines, notamment aux grandes vitesses, lorsqu'elles marchent à faibles introductions. On avait d'abord essayé de pallier cet inconvénient en allongeant la course des tiroirs. Tout récemment, le P-O., en créant un tiroir cylindrique spécial Willoteaux à 2 coquilles concentriques qui double les orifices d'admission et d'échappement des cylindres BP, a également obtenu des résultats très appréciables ⁽¹⁾. Mais il est évident que les soupapes, avec leurs levées rapides ou même instantanées suivant les systèmes, sont appelées à assurer encore un meilleur rendement, en permettant de réaliser des admissions extrêmement faibles et par là-même de longues détente.

C'est ainsi que, sur la nouvelle Pacific que le Réseau d'Alsace et de Lorraine fait actuellement construire à Graffenstaden, et qui sera munie d'une distribution Caprotti ⁽²⁾, on espère marcher à 8 % d'admission, au lieu de 20 à 25 % minimum pour des locomotives à tiroirs. Le Réseau espère obtenir ainsi une marche aussi économique qu'avec une locomotive compound, tout en évitant la complication des 4 attirails moteurs. Cette locomotive, avec sa charge de 20 tonnes par essieu accouplé et son timbre de chaudière de 20 hpz, sera la machine la plus puissante de ce type pour la France, jusqu'à nouvel ordre.

Les autres systèmes de distribution par soupapes appliqués dans notre pays, sont la distribution Dabeg, montée sur les Pacific du P-O., dans sa variante à cames oscillantes avec maintien de l'ancienne coulisse Walschaerts; d'autres réseaux l'ont appliquée dans sa seconde variante à cames rotatives, dont le mouvement est dérivé de l'essieu moteur au moyen de trains d'engrenages. Sur l'Etat, on emploie la distribution Renaud ⁽³⁾, dont les cames sont à saillie variable, suivant la position du changement de marche; le Nord enfin vient de réaliser une distribution Cossart ⁽⁴⁾, qui a donné d'excellents résultats sur ses nouvelles machines de banlieue, au point que cette Compagnie étudie actuellement la transformation de deux de ses Superpacific compound à 4 cylindres en machines à simple expansion avec ladite distribution; elle estime en effet que l'accroissement de puissance interdira à l'avenir de faire appel au compoundage, en raison de l'encombrement des cylindres à basse pression. Cette question reste cependant très ouverte; je n'en citerai comme preuve que le fait que les Allemands, qui avaient été parmi les premiers à abandonner le compoundage après l'introduction de la surchauffe, ont repris les essais comparatifs pour leurs dernières locomotives Pacific, et envisagent également le compoundage pour 2 des 4 nouvelles machines à 25 atmosphères qu'ils font construire en ce moment chez Krupp.

Rendement. — Les perfectionnements ainsi apportés tant à la chaudière qu'au moteur, n'ont pas seulement augmenté la puissance des locomotives, mais encore amélioré sensiblement leur rendement, en permettant de ramener la consommation de charbon à des chiffres très intéressants. Ainsi, les nouvelles Pacific transformées du P-O., tout en soutenant pendant 1 heure une puissance de 2 140 chevaux au crochet du tender à la vitesse de 90 km/h, n'ont dépensé que 1,04 kg de charbon à 8 000 calories (pouvoir supérieur) par ch/h au crochet, et la nouvelle Mountain du P.-L.-M., qui peut soutenir 2 500 chevaux effectifs à 100 km/h, ne

⁽¹⁾ Voir *Revue Générale*, N° de Septembre 1932.

⁽²⁾ Voir *Revue Générale*, N° de Décembre 1928.

⁽³⁾ Voir *Revue Générale*, N° de Décembre 1929.

⁽⁴⁾ Voir *Revue Générale*, N° de Février 1933.

dépense à cette vitesse également que 1 kg de charbon par cheval effectif, ou 600 à 700 grammes par cheval indiqué. Nous sommes là assez loin des 2 à 4 kg qu'un peu trop généreusement les électrificateurs prêtaient à la locomotive à vapeur lors de leur campagne de l'année dernière. La consommation d'eau par cheval indiqué, pour laquelle on admettait jadis 10 à 11 litres, est tombée avec les machines en question à 5,3 — 6 litres.

Et cependant le dernier mot n'est pas dit sur ce point, car de nouvelles tendances se manifestent actuellement en vue d'améliorer le rendement de la locomotive à vapeur, en abandonnant résolument les caractéristiques de la machine qui nous est familière. Avant de vous donner un rapide aperçu de ces tendances, je voudrais cependant vous dire encore quelques mots de certains dispositifs appliqués aux locomotives modernes américaines qu'il m'a été donné l'année dernière d'étudier sur place.

Dispositifs américains. — Comme en Amérique les surfaces de grille dépassent toujours les 5 m² qui sont le maximum de ce qu'un chauffeur peut charger à la main — avec une combustion horaire de 500 kg par m² de grille, cela correspond à 2500 kg de charbon à enfourner par heure —, toutes les fortes machines sont munies de chargeurs automatiques dits stokers, qui amènent le charbon, en le faisant passer par un broyeur, au niveau de la porte de foyer, d'où il est dispersé à l'air comprimé, au gré du chauffeur, vers les différentes parties de la grille. En France, un chargeur de ce genre vient d'être monté sur la nouvelle Mountain de l'Etat qui est actuellement en cours d'essais.

Un autre dispositif qui se généralise sur les locomotives américaines, est le booster. On désigne sous ce nom une machine à vapeur auxiliaire qui rend temporairement moteur, au gré du mécanicien, un essieu porteur de la locomotive, ou des bogies de tenders, augmentant d'autant l'effort de traction ordinairement limité par l'adhérence, c'est-à-dire par la charge sur les essieux accouplés. Cet appareil ne peut être mis en action qu'à faible vitesse, pratiquement jusqu'à environ 25 km/h, alors que la chaudière laisse disponible un volume de vapeur que le manque d'adhérence ne permettrait pas d'utiliser. Il permet donc, soit de démarrer des trains plus lourds ou d'augmenter la vitesse du démarrage, problème qui justifie son application à des locomotives d'express, soit de fournir l'appoint nécessaire pour franchir de fortes rampes, sur des parcours prolongés, cas qui s'applique à des machines à marchandises. Le dispositif comporte 2 cylindres à vapeur, qui actionnent par l'intermédiaire d'un train d'engrenages normalement débrayé, une roue dentée calée sur l'essieu porteur en question, en évitant, par une disposition ingénieuse de robinets travaillant en cascade, qu'il se produise des heurts et des ruptures au moment de l'embrayage.

Le booster est en service en Amérique sur plus de 4 000 locomotives, même les plus fortes comme la machine de 325 t du Northern Pacific, dont le poids adhérent de 250 t pourrait nous sembler suffisant, à nous autres Français. Il est vrai que, pour une locomotive donnée, il procure toujours la possibilité d'ajouter quelques wagons de plus et qu'il évite ainsi souvent le recours à une locomotive de renfort pour aider au démarrage ou pour franchir des points difficiles de la ligne. Certains réseaux américains ont trouvé que le prix de l'appareil s'amortissait en quelques mois, et d'autre part les frais d'entretien sont insignifiants, étant donné que l'appareil n'est généralement appelé à fonctionner que pendant un pourcentage très faible du parcours de la locomotive.

Le booster a déjà fait son apparition en Angleterre, et prochainement nous le verrons aussi en France, le premier appareil construit par la S.A.C.M. étant actuellement aux essais. C'est notre Réseau d'Alsace et de Lorraine, qui en aura la primeur. Appliqué à la lourde locomotive

Santa Fé, à 100 t de poids adhérent, qui vient d'être mise à l'étude, le booster devra permettre, en ajoutant 3 000 kg à son effort de traction, d'assurer la remorque des lourds trains de minerai sur la ligne de Thionville à Audun et à Voelklingen, sans avoir recours à la double traction actuellement en usage avec les Décapod G. 12.

Tendances modernes. — Après cette excursion outre-Atlantique, j'en arrive au dernier chapitre de ma causerie, dans lequel je voudrais vous esquisser au moins certaines formes nouvelles qu'a inspirées ces derniers temps le désir d'améliorer plus radicalement le rendement de la locomotive classique.

Le rendement calorifique global de la locomotive n'atteint en effet, même pour des machines modernes munies de tous les perfectionnements, que 9 à 10 % au crochet. C'est surtout le moteur qui est la cause de cette insuffisance, car pour la chaudière on a atteint un rendement de 65 à 70 % qui doit être considéré comme satisfaisant ; c'est donc surtout sur l'amélioration du moteur que se sont portés les efforts des chercheurs. On comprendra tout l'intérêt de cette question si l'on réfléchit au fait que la consommation de charbon des chemins de fer français a été en 1931 de 28 700 tonnes par jour.

Locomotives à turbines. — La première solution qui devait venir à l'esprit des inventeurs, fut l'emploi de la condensation comme elle est généralisée sur les machines fixes, afin d'utiliser l'énergie contenue dans la vapeur d'échappement, qui, avec la locomotive habituelle, se perd par le cheminée, en ne servant qu'à créer le tirage nécessaire à la combustion de charbon sur la grille. Le trop grand encombrement qui en serait résulté pour les cylindres BP dicta l'emploi de turbines à vapeur, qui présentent d'ailleurs aussi l'avantage d'un meilleur rendement.

La première locomotive à turbines fut étudiée par Zoelly et construite aussitôt après la guerre à Winterthur ; elle comportait une turbine à 6 étages pour la marche avant, et une roue Curtis pour la marche arrière, logées en travers de la machine sous la boîte à fumée, et qui actionnaient, par l'intermédiaire d'un double train d'engrenages, un faux essieu d'où l'effort était transmis aux essieux accouplés de la locomotive. — Les condenseurs à surface se trouvaient immédiatement derrière la turbine, de part et d'autre de la chaudière qui était restée du type normal à surchauffe. Le dispositif imaginé pour le refroidissement de l'eau servant à condenser la vapeur ne donna cependant pas satisfaction, et fit abandonner la question à Winterthur. Elle fut reprise par Krupp⁽¹⁾, en accord avec Zoelly, qui réalisa une locomotive Pacific de 2 000 ch ; après une certaine période de mise au point, cette machine est actuellement en service régulier, de même qu'une machine étudiée par Maffei. L'économie de charbon a été intéressante ; on l'a estimée à 30 ou 40 %, de même celle de l'eau, qui a atteint 50 % par rapport à une locomotive ordinaire, mais la complication de la machine et le prix de revient et d'entretien qui en découlent, ne permettent encore guère d'envisager l'extension de son emploi. Un gros reproche qu'elle encourt en dehors de sa complication, est que son rendement maximum n'est atteint que dans des limites de vitesses très étroites ; à faible vitesse, il tombe au-dessous de celui de la machine à piston.

Un autre type de locomotive à turbine, s'affranchissant davantage des lignes de la locomotive ordinaire, a été réalisé en Suède par Ljungström⁽²⁾. — La condensation y est

(1) Voir *Revue Générale*, Nos de Février 1925, Juillet 1927, Novembre 1930.

(2) Voir *Revue Générale*, Nos de Décembre 1922, Juillet 1924, Mars 1925, Avril 1927, Avril 1928, Février 1930 et Avril 1933.

obtenue par l'air, ce qui nécessite de très grandes surfaces de refroidissement. Tout le tender est en conséquence aménagé en condenseur et, pour éviter une conduite de vide, la turbine est montée sur le tender dont les roues sont rendues motrices, de sorte qu'il constitue le véritable engin moteur, le châssis de la locomotive habituelle ne servant qu'à porter la chaudière et les principaux appareils auxiliaires. Avec une locomotive Ljungström à voie de 1 mètre en service en Argentine, on prétend avoir obtenu des économies de mazout de 40 à 50 %, et de 95 % d'eau. Cette dernière s'explique par le fait que la condensation est obtenue uniquement par circulation d'air, et que la seule consommation d'eau est due aux pertes des appareils de la chaudière, du chauffage, etc. Elle pourrait rendre l'emploi de ce genre de locomotive intéressant pour des régions semi-désertiques où l'eau fait défaut. Pour le reste, son poids exagéré de 122,5 t pour une puissance moyenne de 300 chevaux effectifs seulement, ainsi que les difficultés de la manutention, qui nécessitent un personnel très spécialisé, ne paraissent guère laisser de chances d'applications plus étendues.

Locomotives à haute pression — Aussi les recherches actuelles se concentrent-elles plutôt sur l'emploi des très hautes pressions, l'élévation du timbre devant permettre de réaliser des économies substantielles par rapport à la locomotive habituelle, sans avoir recours à la condensation, qui nécessite de nombreux appareils auxiliaires susceptibles de causer bien des ennuis en service courant.

La première locomotive à haute pression a été construite à Winterthur⁽¹⁾, et mise aux essais à partir de 1927, d'abord en Suisse, puis aussi en France. La locomotive comporte une chaudière à tubes d'eau haute et courte, timbrée à 60 kg, qui laisse à l'avant du châssis la place pour une machine à vapeur à grande vitesse, actionnant, par l'intermédiaire d'engrenages réducteurs, un faux essieu qui entraîne les essieux accouplés au moyen de bielles. La chaudière est constituée essentiellement par un gros collecteur supérieur et 2 petits collecteurs inférieurs, reliés par des tubes vaporisateurs formant ciel et parois latérales du foyer, un surchauffeur à éléments verticaux placé à l'avant du foyer, et ensuite un réchauffeur secondaire d'eau d'alimentation. L'alimentation en eau se fait au moyen d'une pompe qui refoule l'eau des soutes d'abord à travers un réchauffeur primaire fonctionnant avec de la vapeur d'échappement du moteur, puis à travers le réchauffeur secondaire, d'où elle passe à une température de 250° dans le collecteur supérieur. La machine à vapeur de la locomotive d'essai comportait 3 cylindres à équicourant, avec distribution par soupapes.

Les essais ont donné des économies de charbon de 30 à 40 %, et d'eau de 50 %, c'est-à-dire du même ordre que la locomotive à turbines Zoelly, mais ont démontré la nécessité d'apporter quelques retouches à la chaudière, qui maintenait difficilement sa pression. Une locomotive plus puissante, du type Pacific, est actuellement en étude pour la Compagnie du Nord, avec des dimensions de grille identiques à celles des Superpacific de ce réseau, de façon à avoir une base de comparaison solide entre les deux types. Cette locomotive aura un moteur à 6 cylindres à équicourant, et une charge de 22 t par essieu.

D'autres types de locomotives à haute pression ont été réalisés en Allemagne. Il y a d'abord la machine Schmidt-Henschel⁽²⁾ à 60 kg, dont des échantillons sont en service non seulement en Allemagne, mais encore en Angleterre sur le London Midland and Scottish, en Amérique sur le Canadian Pacific et le New-York Central, et enfin en France sur le P.-L.-M. Cette

(1) Voir *Revue Générale*, N° de Décembre 1928.

(2) Voir *Revue Générale*, Nos d'Août 1929, et Janvier 1932.

machine comporte deux systèmes de chaudières : la chaudière HP à circuit primaire fermé, composée d'un foyer dont les parois et le ciel sont formés de tubes reliant 2 collecteurs supérieurs au collecteur inférieur en forme de cadre de bas de foyer, et d'où partent des serpentins de vapeur dont la pression atteint jusqu'à 110 kg et qui vaporisent, par la chaleur qui se dégage de leur surface, l'eau contenue dans un corps cylindrique placé au-dessus du foyer, en portant sa pression à 60 kg. Une seconde chaudière à basse pression du type normal de locomotive, avec surchauffeur dans les gros tubes, se trouve en prolongement du foyer et produit de la vapeur à 14 kg.

La vapeur de 60 kg produite dans la chaudière HP, après avoir traversé un surchauffeur, alimente le cylindre HP et échappe dans les conduits d'admission des cylindres BP, où elle se mélange à la vapeur surchauffée provenant de la chaudière BP. Ce mélange se détend dans les cylindres BP et s'échappe ensuite par la cheminée, comme pour une locomotive ordinaire.

L'avantage de cette disposition consiste en son circuit primaire fermé, qui n'a pas besoin d'être alimenté, car c'est toujours la même eau, distillée à l'origine, qui circule. Il n'y a donc rien à craindre au point de vue de l'entartrement, particulièrement dangereux pour des tubes contenant de l'eau chaude à haute pression. L'alimentation en eau du ballon supérieur, où se forme la vapeur de 60 kg, est effectuée par une pompe qui prélève de l'eau chaude sur la chaudière BP.

Au P.-L.-M., la locomotive à haute pression est du type Mountain, semblable aux 145 machines du même type que cette Compagnie a en service. Elle réalise la même puissance que ces dernières timbrées à 16 kg, mais avec une surface de grille de 3,9 au lieu de 5 m², et en donnant une économie de charbon de 20 %. Autrement dit, à grille égale, elle permettrait de développer une puissance d'environ 25 % supérieure. La consommation de charbon par cheval-heure au crochet est tombée à 800 grammes à la vitesse de 70 km/h et à 1 kg à l'allure de 100 km/h. Cependant les essais ont fait ressortir l'intérêt qu'il y aurait à utiliser une plus grande proportion de vapeur HP dans l'appareil moteur, celle-ci n'étant au maximum que de 70 % sur la locomotive P.-L.-M. Avec une locomotive à haute pression intégrale, c'est-à-dire avec suppression complète de la chaudière BP, on calcule que l'amélioration du rendement thermique par rapport à la chaudière normale à 16 hpz, serait d'environ 36 %, au lieu de 23 % atteint avec la locomotive actuelle. C'est donc vers la locomotive à haute pression intégrale que paraissent devoir s'orienter les nouvelles recherches.

La seconde réalisation allemande est la locomotive Loeffler-Schwartzkopff⁽¹⁾, pour pression de 100 à 120 atmosphères. La vapeur à haute pression y est également produite dans un corps cylindrique soustrait à l'action des flammes, mais qui fonctionne comme un réchauffeur par mélange. La chaleur est fournie à ce réchauffeur par sa propre vapeur, refoulée par deux pompes à travers le foyer de la chaudière, composé de serpentins où elle se surchauffe avant de retourner au réchauffeur. Sur la dernière partie de ce trajet est établie une dérivation qui fournit la vapeur aux 2 cylindres HP de la locomotive. Après avoir travaillé dans ces cylindres en se détendant à 18 kg, cette vapeur, préalablement déshuilée, passe dans les tubes d'un réchauffeur à surface, où elle se condense pour être refoulée par les pompes d'alimentation dans le corps cylindrique HP, accomplissant ainsi un cycle fermé. Le réchauffeur à surface vaporise l'eau pour fournir de la vapeur à 15 kg au circuit BP, qui la conduit à travers un surchauffeur au cylindre BP, où elle se détend à la pression atmosphérique avant de s'échapper par la cheminée. L'appoint en eau

(1) Voir *Revue Générale*, N° de Mai 1930.

d'alimentation pour le circuit HP, nécessaire pour compenser les déperditions de vapeur dans ce circuit, est fourni par une pompe auxiliaire qui puise de l'eau dans le réchauffeur BP.

La réussite de la locomotive Loeffler dépendra essentiellement du fonctionnement de ses appareils auxiliaires, qui sont malheureusement nombreux, ainsi que de la tenue des serpentins formant les parois du foyer dont on peut se demander s'ils se comporteront aussi bien étant remplis de vapeur, que s'ils étaient remplis d'eau comme aux chaudières Winterthur et Schmidt-Henschel.

De toute façon, le problème de la locomotive à haute pression ne pourra être considéré comme résolu que lorsque les machines auront plusieurs années de service courant à leur actif. Il importera non seulement de savoir si le rendement thermique constaté lors des essais se maintiendra, mais surtout si les frais d'entretien, étant donné les nouveaux problèmes de chaudronnerie qui se sont posés, n'enlèveront pas leur intérêt pratique à ces nouveaux engins, dont le prix de revient dépassera toujours celui de notre vieille locomotive classique.
