



TOGETHER
for a sustainable future

OCCASION

This publication has been made available to the public on the occasion of the 50th anniversary of the United Nations Industrial Development Organisation.



TOGETHER
for a sustainable future

DISCLAIMER

This document has been produced without formal United Nations editing. The designations employed and the presentation of the material in this document do not imply the expression of any opinion whatsoever on the part of the Secretariat of the United Nations Industrial Development Organization (UNIDO) concerning the legal status of any country, territory, city or area or of its authorities, or concerning the delimitation of its frontiers or boundaries, or its economic system or degree of development. Designations such as “developed”, “industrialized” and “developing” are intended for statistical convenience and do not necessarily express a judgment about the stage reached by a particular country or area in the development process. Mention of firm names or commercial products does not constitute an endorsement by UNIDO.

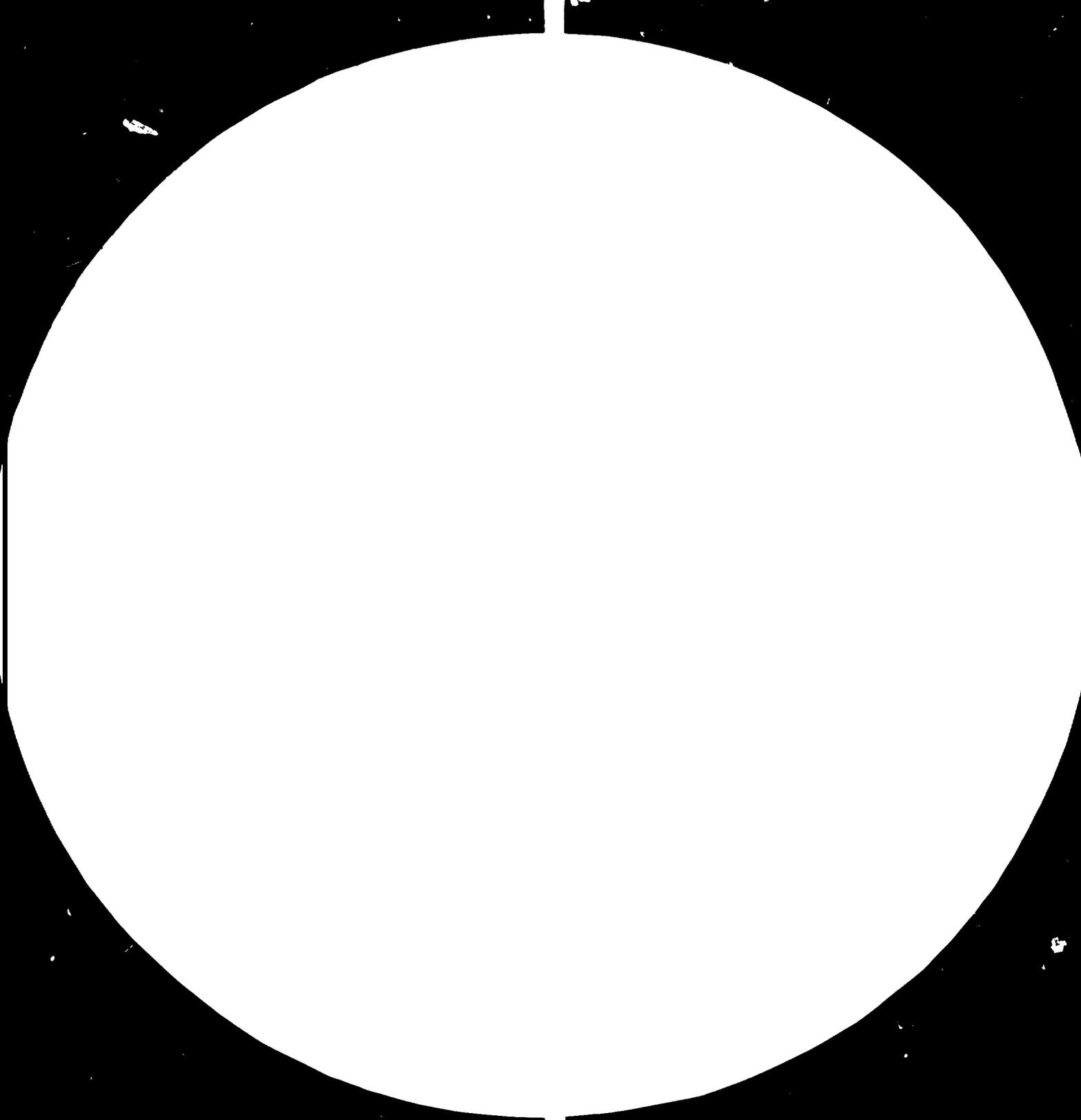
FAIR USE POLICY

Any part of this publication may be quoted and referenced for educational and research purposes without additional permission from UNIDO. However, those who make use of quoting and referencing this publication are requested to follow the Fair Use Policy of giving due credit to UNIDO.

CONTACT

Please contact publications@unido.org for further information concerning UNIDO publications.

For more information about UNIDO, please visit us at www.unido.org



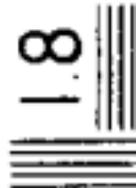


28

25



3.



1.25

A resolution test chart for 1.25 cycles per millimeter. It consists of a central number '1.25' flanked by two groups of five horizontal lines and two groups of five vertical lines, all in black on a white background.

1.4

A resolution test chart for 1.4 cycles per millimeter. It consists of a central number '1.4' flanked by two groups of five horizontal lines and two groups of five vertical lines, all in black on a white background.

1.6

A resolution test chart for 1.6 cycles per millimeter. It consists of a central number '1.6' flanked by two groups of five horizontal lines and two groups of five vertical lines, all in black on a white background.

1.8

A resolution test chart for 1.8 cycles per millimeter. It consists of a central number '1.8' flanked by two groups of five horizontal lines and two groups of five vertical lines, all in black on a white background.

12406

DP/ID/SER.B/364

14 janvier 1983

FRANCAIS

Distr. RESTREINTE

Zaire.
UTILISATION DE LOCOMOTIVES DECLASSEES
COMME SOURCE D'ENERGIE DE PETITES ENTREPRISES .

SI/ZAI/82/801

REPUBLIQUE DU ZAIRE

Rapport final*

établi pour le Gouvernement zaïrois
par l'Organisation des Nations Unies pour le développement industriel,
Organisation chargée de l'exécution pour le compte
du Programme des Nations Unies pour le développement

d'après les travaux de M. Dmitre Stroyanov,
Expert ingénieur mécanicien-thermicien

Organisation des Nations Unies pour le développement industriel
Vienne

* Le présent rapport n'a pas fait l'objet d'une mise au point rédactionnelle.

RESUME ET CONCLUSIONS

Les conditions techniques aux Ateliers Centraux de la SNCZ et au dépôt de Kamina, où sont stockées les locomotives à vapeur déclassées, n'ont pas permis l'organisation d'un examen très approfondi et complet des chaudières. L'inspection générale à laquelle nous avons procédé a montré que les chaudières de toutes les locomotives et en particulier de celles des séries 700 et 900 sont dans un très mauvais état. Le matériel du foyer et des tubes est profondément corrodé, l'entattement des tubes et du corps cylindrique dépasse largement les normes prescrites, plusieurs accessoires ainsi que le calorifugeage et certaines parties de l'enveloppe manquent. Donc la dégradation des machines inspectées est telle qu'il y a peu de chances d'un réconditionnement éventuel pour l'utilisation comme générateurs de vapeur dans les petites entreprises agro-industrielles.

Si néanmoins après un examen plus détaillé quelques chaudières pourraient être trouvées réparables, leur remise en état se heurterait à des difficultés énormes: manque de pièces de rechanges, des conditions techniques nécessaires et de personnels compétents, nécessité d'investissements considérables pour les dispositifs d'alimentation et de tirage, transport difficile des chaudières etc...

Compte tenu de ces constatations nous proposons que l'idée (le projet) de remise en état des chaudières des locomotives déclassées pour leurs utilisations dans le domaine de l'industrie et la production de l'électricité soit abandonnée.

NOTES EXPLICATIVES

La valeur de la monnaie Zaïroise au mois d'octobre 1982 est de Zaïres 5,83 pour un dollar des Etats Unis.

Etant donné que les valeurs des caractéristiques des chaudières et d'autres éléments utilisés dans la bibliographie, sont exprimées en utilisant l'ancien système d'unités, nous avons adopté ce système pour le calcul de la capacité de production de la chaudière (Annexe 2), mais nous avons traduit toutes les valeurs numériques indiquées dans le présent rapport en unités du Système International (SI)

INTRODUCTION

La crise d'énergie mondiale et l'augmentation des prix du pétrole du marché international ont poussé les gouvernements de plusieurs pays vers la recherche de solutions basées sur la promotion et le développement de nouvelles sources d'énergie. Le Gouvernement du Zaïre en tenant compte du potentiel du pays en énergies renouvelables et notamment de ses ressources de bois considérables a demandé à l'ONUDI une assistance pour étudier les possibilités de développement des ressources d'énergie. C'est dans ce but qu'en 1980 a été organisée la mission de M. Pierre Verstraete, expert de l'ONUDI. En conclusion de ses travaux un certain nombre de projets ont été proposés afin que puissent être menées à bien certaines actions prioritaires dans le domaine énergétique (4). C'est dans le cadre de ce plan qu'en 1981 l'ONUDI a organisé la mission d'un expert pour une durée d'un mois pour évaluer les possibilités d'utilisation des locomotives déclassées de la SNCZ comme source d'énergie de petites entreprises.

Le cahier des charges de l'expert a été formulé comme suit :

- a. Visite du dépôt de Mutshasha (Shaba), inspection et évaluation de l'état des locomotives, en particulier des chaudières du type 700.
- b. Détermination de la capacité théorique des chaudières (quantité et qualité de la vapeur produite, pression, température, degré de saturation).
- c. Détermination des possibilités de production des chaudières, compte tenu de leurs états effectifs après reconditionnement éventuel.
- d. Evaluation des possibilités de réutilisation des chaudières à des fins industrielles ou pour la production d'énergie.
- e. Préparation d'un cahier de charges en vue du reconditionnement des chaudières.
- f. Estimation du coût des travaux à effectuer pour la remise en état des chaudières.

.../...

g. Sur la base des conclusions résultant de ces études et analyses, rédaction, en coopération avec les responsables du Gouvernement, d'un rapport final et le document de projet pour l'assistance future de la part de l'ONUDI à la République du Zaïre dans le domaine de l'utilisation de locomotives déclassées comme sources d'énergie de petites entreprises.

L'expert a été présenté par le Siège de l'ONUDI à Vienne au Gouvernement Zaïrois qui a retenu sa candidature pour l'exécution de cette mission.

La mission a commencé le 20 octobre 1982 à Kinshasa et a pris fin le 12 novembre 1982. Elle comportait les quatre phases suivantes :

- Elaboration d'un plan des travaux et coordination du programme avec les représentants du Gouvernement ;
- Visite de la Direction de la SNCZ et des Ateliers Centraux de la Société à Lubumbashi dans le but d'étudier la documentation technique des locomotives à vapeur déclassées et d'inspecter les locomotives stockées aux Ateliers Centraux ;
- Visite du dépôt de la SNCZ à Kinshasa, inspection des locomotives des séries 700, 800 et 900 ;
- Communication des résultats des travaux aux représentants du Département de l'Energie et du Commissariat Général au Plan du Zaïre ;
- Rédaction du rapport final.

Répondant au désir exprimé par les représentants du Commissariat Général au Plan que le plus grand nombre de locomotives déclassées soient englobées dans les travaux, l'expert a étendu la liste des machines à examiner en y incorporant les locomotives des séries 200^s, 400, 850 et 900, dont les caractéristiques sont présentées dans l'annexe 1. Un examen approfondi de l'état de ces locomotives aux Ateliers Centraux de la SNCZ à Lubumbashi a cependant montré que seules les chaudières des séries 700 et 900 peuvent être éventuellement réutilisées, les chaudières des autres locomotives ne représentant que quelques restes complètement dégradés et décomposés. Dans cette situation et compte tenu des conditions techniques, nécessaires pour l'accomplissement de l'expertise, le programme de la mission a été légèrement modifié et après l'inspection des locomotives stockées aux Ateliers Centraux à Lubumbashi, l'expert a visité le dépôt de Kamina où les séries 700 et 900 sont parquées.

Au cours de la mission l'expert a rencontré les personnalités suivantes :

Commissariat Général au Plan

- Citoyen TANSIA, Administrateur civil ;
- Citoyen YUMAINE, Chargé du Secteur Energie, à la Direction de la Prévision ;
- Citoyen MBUYI, Administrateur civil ;

Département de l'Energie

- Citoyen SIMANGA, Conseiller Technique ;
- Citoyen KAYIMA, Chef de Division Electricité.

Société Nationale de Chemins de Fer Zaïrois (SNCZ)

- Monsieur _____, Le Directeur à la Direction à Kinshasa ;
- Monsieur FAUTRE, Directeur du Matériel aux Ateliers Centraux à Lubumbashi ;
- Monsieur PETIT, Chef du Bureau aux Ateliers Centraux à Lubumbashi ;
- Citoyen MUTOMBO, Représentant du Directeur de la Région à Kamina ;
- Citoyen LOBIA, Chef du Groupe de Traction et de Matériel (T M) à Kamina ;
- Citoyen LUKUSA, Remplaçant du Chef du Groupe T M à Kamina ;
- Citoyen NTANDA, Chef du Dépôt de locomotives à Kamina.

Direction Régionale du Plan

- Citoyen KINDOMBI, Chef de la Direction Régionale du Plan pour Shaba, Lubumbashi.

L'expert tient à exprimer sa profonde reconnaissance aux agents des Nations Unies à Kinshasa et à Lubumbashi, en particulier au Représentant Résident du Programme des Nations Unies, Monsieur Jean Labbens, au Représentant de l'ONUDI, Monsieur Michel Leoble, Conseiller Principal pour le développement industriel et à Monsieur O. Svabensky, Conseiller Technique Principal, auprès desquels il a trouvé toute l'aide nécessaire pour l'accomplissement de sa mission.

.../...

I. DETERMINATION DE LA CAPACITE DE PRODUCTION DES CHAUDIÈRES DE LA SERIE 700

A. Détermination de la capacité théorique des chaudières

Le calcul de la productivité des chaudières a été fait pour les locomotives de la série 700 car, d'un côté, les machines de ce type sont les plus nombreuses dans le stock actuel de la SNCZ et, d'autre côté, leur remise en état éventuelle semble plus justifiée que celle de la série 900 compte tenu du fait que cette dernière a été aménagée pour le travail avec combustible liquide.

Le manque d'informations sur les exigences des consommateurs éventuels de l'énergie, produite par les chaudières reconditionnées, nous a contraint à faire a priori quelques suppositions concernant le régime et les conditions de travail. Ainsi a-t-il été admis que la pression de la vapeur ne dépasserait pas 5 ou 6 bars, ce qui est souvent le cas dans les petites entreprises agro-industrielles. Cela signifie que la surchauffe doit être éliminée. Cette solution est imposée aussi par le fait que le système de surchauffe des chaudières de locomotives, exploitées comme générateurs de vapeurs stationnaires, est une source de pannes nombreuses. Les fissures en masse des éléments surchauffeurs ont donc amené à ce que dans des cas pareils on se contente de vapeur saturée (6). Quant au titre de la vapeur produite (la proportion de vapeur par rapport au poids total), pour les chaudières de locomotives sa valeur est de l'ordre de 0,92-0,97.

Il convient de souligner que la capacité de productivité de la chaudière a été déterminée avec la supposition que le taux de combustion horaire serait de l'ordre de $400/m^2h$, ce qui correspond au régime nominal de la chaudière. Pour réaliser cette performance cependant il est indispensable que le tirage de la chaudière soit forcé.

Comme le projet prévoit l'utilisation de bois pour la chauffe des chaudières on a pris en considération le cas de bois séchés à l'air dont la teneur en eau ne dépasse pas 20 %. C'est le cas le plus avantageux pour ce type de carburant, car son pouvoir calorifique atteint 3200 kcal/kg (13395 kJ/kg) les valeurs maximales pour le bois séchés à l'air se situant au niveau de 3500 kcal/kg (14651 kJ/kg), (1), (6).

Le calcul de la productivité de la chaudière a été fait d'après la méthode de S Syromyatnikov(5). Les étapes principales de cette procédure sont :

- détermination des pertes par la combustion incomplète du carburant ;
- calcul de la température de combustion et de la température des gaz à l'entrée des tubes ;
- calcul de la quantité de chaleur transmise au foyer ;
- évaluation des vitesses des gaz aux tubes à fumée et aux tubes-foyer et détermination des coefficients de transmission de chaleur respectifs ;
- calcul des quantités de chaleur transmises aux tubes à fumée et aux tubes-foyer ;
- détermination de la productivité totale de la chaudière et de son rendement brut.

Le calcul détaillé est présenté dans l'annexe 2. Les résultats obtenus montrent que la capacité de production de la chaudière de type 700 en régime nominal sans surchauffe peut être évaluée à 5393 kg/h ($14,830 \cdot 10^6$ kJ/h) à condition que la pression de la vapeur soit 5 bar (0,5 MPa), la température 150°C et le titre 0,95. Cette valeur est à peu près deux fois moins grande que les valeurs respectives pour les chaudières analogues utilisant le charbon ou le mazout (1), (2), (3), ce qui s'explique d'ailleurs par la différence dans le pouvoir calorifique du combustible.

Une comparaison des caractéristiques des chaudières de types 700 et 900 permet de constater qu'à une surface de chauffe à peu près égale ($247,55 \text{ m}^2$ pour la série 700 et $234,7 \text{ m}^2$ pour la série 900) elles ont une différence dans la surface de grille ($3,98 \text{ m}^2$ pour la série 700 et $5,36 \text{ m}^2$ pour la série 900). En supposant que le taux de combustion horaire soit le même pour les deux séries, on peut évaluer la productivité de la chaudière du type 900 à 7800 kg/h. Le rapport des efforts de traction des deux locomotives (11760 kg pour la série 700 et 18000kg pour la série 900) prouve qu'une telle approximation peut être considérée comme réelle.

.../...

B. Détermination de la capacité de production des chaudières après leur reconditionnement éventuel

Quand il s'agit d'évaluer la capacité de production des chaudières reconditionnées, il faut considéré deux cas différents:

- le travail de la chaudière avec un tirage forcé ;
- le travail avec le tirage normal.

La première possibilité ne peut être réalisée dans les conditions stationnaires qu'avec un dispositif spécial fournissant la qualité d'air nécessaire pour la combustion complète du carburant. En effet, le tirage forcé sur la locomotive est effectué par le dispositif d'échappement, où l'énergie de la vapeur travaillée dans la machine est utilisée pour la réalisation de la sous-pression nécessaire. Or dans les conditions de travail envisagées pour les chaudières reconditionnées on ne dispose pas de vapeur travaillée et cela exige la construction et la mise au point d'un groupe de tirage forcé (ventilateur avec entraînement électrique et tuyauterie).

Il existe une autre solution : l'utilisation du syphon de la chaudière qui normalement fonctionne lorsque la locomotive est en stationnement et la consommation de vapeur est très faible par rapport au régime nominal. Cette variante a pourtant deux inconvénients importants : le syphon ne peut pas assurer le tirage, nécessaire pour atteindre le régime nominal, et la consommation de vapeur pour son fonctionnement est considérable - entre 7 et 12 % de la productivité de la chaudière (6). Ces deux désavantages du tirage forcé, réalisé par le syphon, ont amené à ce que cette solution ne soit pas adoptée en pratique.

Si on utilise le tirage forcé avec une chaudière reconditionnée sa capacité de production ne différera pas beaucoup de la capacité d'une chaudière neuve. En effet, les seuls facteurs qui peuvent négativement influencer les caractéristiques de la chaudière sont l'accumulation de tartre et de suie sur les tubes. Il est tout à fait important de souligner la diminution considérable du rendement et de la capacité de production causée par la suie. Le coefficient de conductivité de chaleur de cette dernière n'étant que $0,4186 \text{ kJm}^2\text{h}^\circ\text{C}$ (ce coefficient a pour l'acier la valeur de $209,3 \text{ kJm}^2\text{h}^\circ\text{C}$)

.../...

une couche de suie d'une épaisseur d'un millimètre a une résistance thermique équivalente à celle d'une paroi en fer de 22 millimètres et provoque la diminution du coefficient de transmission de chaleur de 20 à 30 % (3).

Il est toutefois difficile de prévoir l'état d'une chaudière après un certain nombre d'heures de travail car il dépend de plusieurs facteurs de caractères différents. En revanche, il est certain que si la chaudière est exploitée dans des conditions normales et si la fréquence des révisions prévues par le règlement est respectée, la capacité de production de la chaudière vers la fin de la période entre deux révisions consécutives ne devrait pas différer de plus de 10 à 15 % de la capacité initiale.

En ce qui concerne la productivité d'une chaudière, travaillant avec tirage naturel, elle est 20 - 40 fois inférieure à la productivité réalisée au tirage forcé (6). Il est donc évident que cette solution ne peut pas être considérée comme acceptable, car dans le cas de la chaudière du type 700 elle ne pourrait assurer que 135 + 270 kg de vapeur par heure.

II. EVALUATION DE L'ETAT DES CHAUDIERES DE LOCOMOTIVES DE TYPE 700 ET 900

Les règlements d'exploitation des chaudières adoptés par les administrations ferroviaires, prévoient un système de contrôle strict sur leur état. Cela s'explique par les conséquences graves que pourraient avoir l'explosion d'une chaudière défectueuse.

Dans le cas général la révision d'une chaudière de locomotive comporte les opérations suivantes :

- a. démontage de l'enveloppe du corps cylindrique et du calorifugeage ;
- b. nettoyage du corps cylindrique, de la boîte à feu et du foyer ;
- c. soumission de la chaudière à une épreuve hydraulique à une pression dépassant de 5 bar la pression normale ;
- d. démontage et inspection des éléments surchauffeurs ;
- e. évaluation de l'épaisseur des parois du foyer et de la boîte à feu ;
- f. démontage et évaluation de l'état des tubes ;
- g. révision de la boîte à fumée, de la grille et de détails accessoires (injecteurs, tuyauterie extérieure, soupapes de sécurité, dispositifs de tirage etc).

.../...

De plus si la chaudière a déjà travaillé ou est susceptible d'avoir travaillé plus de 40 ans, le matériel du corps cylindrique doit être soumis à des épreuves pour évaluation de sa résistance à l'extention et à la flexion. Etant donné que les conditions techniques aussi bien aux Ateliers Centraux qu'au dépôt de Kamina ne permettaient pas l'organisation d'un tel examen détaillé, l'expert a été contraint de se limiter à une inspection générale des éléments de la construction qui étaient plus ou moins accessibles : l'intérieur du foyer, la boîte à fumée, quelques éléments du corps cylindrique les tubes et les détails accessoires.

La liste des locomotives dont les chaudières ont été inspectées est donnée au tableau 1.

Tableau 1

N° de la locomotive	Localité	N° de la locomotive	Localité
704	Kamina	904	Kamina
709	Lubumbashi	905	"
714	Kamina	906	Lubumbashi
718	Lubumbashi	907	Kamina
855	Kamina	908	"
901	"	911	"
902	"	912	Lubumbashi
903	"		

Il convient de remarquer ici que l'état des locomotives, stockées à Lubumbashi, était évalué comme extrêmement grave et ne donnant aucune chance d'une éventuelle remise en état. L'examen de ces chaudières a été pourtant mené jusqu'au bout dans le but de recueillir le maximum possible d'informations sur l'état de ces deux types de chaudières.

L'inspection de 5 chaudières, figurant sur la liste, ainsi que l'examen de quelques locomotives d'autres séries, stockées à Lubumbashi nous ont permis de faire les constatations suivantes :

.../...

- a. l'état de la tôle de la boîte à feu est insatisfaisant. La corrosion englobe une partie considérable de la surface et surtout dans la zone du cadre. Certains rivets et entretoises sont aussi très corrodés.
- b. les surfaces extérieures de tous les tubes sont couvertes d'une couche de tartre dont l'épaisseur varie entre 2 et 4 mm, c'est-à-dire elle est quelque fois plus grande que l'épaisseur maximale permise (0,5 mm).
- c. les tubes des chaudières, stockées à Kamina, sont très corrodés, la profondeur de la corrosion atteint parfois 1 - 1,5 et même 2 mm et cela sur des surfaces dépassant quelques dizaines de centimètres carrés.
- d. le matériel du corps cylindrique est aussi sensiblement saisi par la corrosion.
- e. le calorifugeage du foyer et du corps cylindrique manque ainsi de plusieurs éléments de l'enveloppe des chaudières.
- f. l'appareillage, la tuyauterie extérieure et les dispositifs d'alimentation (les injecteurs) manquent sur toutes les locomotives.

Il faut aussi ajouter que les faisceaux tubulaires des locomotives, stockées à Lubumbashi, sont presque totalement décomposés. Quant aux locomotives disloquées à Kamina, leur tuyauterie intérieure n'a pas été démontés, mais elle est très corrodée à cause de la petite quantité d'eau qui est restée dans chaque chaudière.

III. EVALUATION DES POSSIBILITES DE REUTILISATION DES CHAUDIERES

Les constatations qui ont été faites au chapitre précédent montrent que l'état des chaudières de séries 700 et 900 donne peu de chances pour un reconditionnement éventuel. Néanmoins, la possibilité de restitution de quelques chaudières qui pourrait être confirmée après un examen plus approfondi et détaillé n'est pas à exclure. C'est pour cela que nous allons examiner les possibilités de reutilisation des chaudières des séries 700 et 900.

A. Production de vapeur pour chauffage ou pour les petites entreprises agro-industrielles

Cette utilisation des chaudières reconditionnées est la plus facile à réaliser et du point de vue économique la plus efficace. Comme nous avons déjà indiqué au chapitre II une chaudière du type 700, munie d'un dispositif de tirage forcé, peut produire environ 5400 kg de vapeur saturée par heure à une pression de 0,5 MPa (150°C) et au titre de 0,95, ce qui correspond à une quantité de chaleur de l'ordre de $15,10^6$ kJ/h. Pour la chaudière de la série 900 les chiffres respectifs sont 7800 kg/h et $21,5.10^6$ kJ/h. Il est important de souligner que ces productivités peuvent être réalisées avec un rendement de l'ordre de 76 % qui peut être considéré comme tout à fait satisfaisant. Rappelons aussi que ces performances sont envisagées en utilisant un combustible dont le pouvoir calorifique inférieur ne dépasse pas 3200 kcal/kg (13395 kJ/kg). Si le carburant utilisé était d'une meilleure qualité (teneur en eau plus faible que 20%), la productivité des chaudières augmenterait presque proportionnellement à son pouvoir calorifique.

Il convient de même de noter qu'en principe le travail à une pression de la vapeur plus élevée n'est pas impossible. Mais il exigera une augmentation des investissements, nécessaires pour la remise en état du système de surchauffe, ainsi que des dépenses pour l'entretien des chaudières, compte tenu de la fiabilité insatisfaisante des éléments surchauffeurs à un régime stationnaire.

B. Production d'électricité ou d'énergie mécanique

Il est bien connu que la chaudière d'une locomotive ne peut pas produire ni d'électricité, ni d'énergie mécanique sans être équipée d'une machine à vapeur et pour le cas de production d'électricité d'un générateur électrique. Or l'adoption d'une telle solution n'est pas à conseiller pour deux raisons principales :

- Le rendement d'un tel groupe énergétique sera exclusivement bas.
- Le montant des investissements pour la construction et la mise au point du groupe sera très élevé.

Comme nous l'avons montré aux chapitres précédents le rendement de la chaudière seule atteint une valeur assez intéressante. Ce n'est pas cependant le cas de la machine à vapeur dont le rendement maximum ne peut pas en aucun cas dépasser 10 %. Etant donné que le rendement total d'un groupe pour la production d'énergie mécanique ou électrique est toujours le produit des rendements des machines composantes, nous pouvons compter théoriquement sur un rendement total de l'ordre de 7 %. Or ce niveau d'efficacité ne peut être atteint que si la machine à vapeur est alimentée de vapeur surchauffée. Nous avons pourtant déjà prouvé que le travail à ce régime dans des conditions stationnaires pose des problèmes difficiles. Compte tenu de cette circonstance nous devons évaluer le rendement éventuel d'un groupe pour la production d'énergie mécanique ou électrique à quelque 2 - 4 % et cela sans prendre en considération le rendement du générateur électrique et de l'entraînement mécanique.

Donc il est évident que sur le plan économique une telle variante ne peut pas donner des résultats acceptables même si le prix des combustibles était assez bas.

En ce qui concerne les investissements, nécessaires pour la réalisation d'un tel projet, ils seraient sans doute considérables vu les prix très élevés des générateurs électriques et des réducteurs mécaniques sur le marché international.

IV. CAHIER DES CHARGES EN VUE DU RECONDITIONNEMENT DES CHAUDIERES

Il convient de souligner encore une fois que la possibilité du reconditionnement des chaudières des vieilles locomotives à vapeur de la SNCZ est peu probable et qu'elle ne pourrait être confirmée qu'après un examen plus approfondi, mené aux conditions convenables et conformément au programme présenté au chapitre II.

Nous allons quand même, sans entrer dans les détails, dresser un cahier des charges en vue du reconditionnement éventuel des chaudières. Les travaux qui doivent être organisés dans ce cas sont :

- Réparation des systèmes de graissage et des équipages des locomotives dont les chaudières sont à remettre en état .
- Transport des locomotives des dépôts de Kamina et de Mushasha jusqu'à la place, où la remise en état sera réalisée.
- Démontage des chaudières des locomotives.
- Démontage des tous les tubes, nettoyage de ceux qui peuvent être remontés et remplacement des tubes usés.
- Réparation du foyer avec remplacement des entretoises défectueuses et soudure des fissures de la tôle.
- Réparation des plaques tubulaires.
- Réparation de la boîte à fumée, de la grille, de cendrier, de la tuyauterie extérieure et de l'appareillage.
- Transport des chaudières jusqu'aux entreprises et leurs montages sur place.
- Montage du dispositif de tirage forcé et des pompes d'alimentation.
- Organisation d'une épreuve hydraulique pour contrôler l'étanchéité de la chaudière.

La réparation d'une chaudière de locomotive est une technique très compliquée et difficile. Il nous est tout à fait impossible de donner ici une description détaillée de toutes les opérations nécessaires. Nous allons nous contenter de noter que la technologie de réparation étant fixée par les règlements des administrations ferroviaires, le reconditionnement des chaudières des locomotives déclassées devrait se produire conformément aux documents de la SNCZ.

.../...

En ce qui concerne la documentation technique, les problèmes qui se posent ne sont pas difficiles à résoudre. Il n'est pas de même sur le plan technologique. D'après l'information qui nous a été communiquée par M. J. Fautré, Directeur du Matériel aux Ateliers Centraux, la SNCZ actuellement ne dispose ni de matériel, ni de personnels compétents pour un éventuel reconditionnement des chaudières. Dans cette situation il faudrait sans doute chercher une autre solution, la réimplantation par exemple, dans une grande entreprise, où les conditions nécessaires seraient assurées.

Or dans ce cas il y aurait un autre problème difficile: le transport des chaudières jusqu'à la place de reconditionnement. Bien que nous ne disposions pas de données précises sur le poids des chaudières, il n'est pas sans doute inférieur à 22 - 24 t, ce qui exigerait des moyens de transport d'une capacité considérable.

V. ESTIMATION DU COUT DES TRAVAUX POUR LA REMISE EN ETAT DES CHAUDIERES

Compte tenu des constatations qui ont été faites aux chapitres précédents, il est difficile d'évaluer le coût des travaux pour le reconditionnement éventuel des chaudières. C'est pour cette raison que nous allons donner seulement la liste des matériels les plus importants qui seraient nécessaires pour la remise en état et la mise en oeuvre d'une chaudière de la série 700 :

- deux pompes à eau à un débit de 1000 l/min et à une pression de 0,6 MPa (6bar) ;
- un ventilateur avec entraînement électrique à un débit de $1,25\text{m}^3/\text{s}$ et à une pression de 3000 N/m^2 (300 kg/m^2) ;
- 2840 kg (950 m) tubes aux dimensions $\varnothing 51/46\text{ mm}$;
- 2330 kg (184 m) tubes aux dimensions $\varnothing 133/125\text{ mm}$;
- $1-2\text{ m}^2$ de tôle en acier douce à l'épaisseur de 10 mm ;
- $1-2\text{ m}^2$ " " " " de 14-16 mm.

Ne disposant pas d'une information quelconque sur les prix de ces matériels en République du Zaïre nous ne pouvons pas donner une évaluation des dépenses pour leur achat.

BIBLIOGRAPHIE

1. A. Chapelon. La locomotive à vapeur. Paris Dunod 1936.
2. E. Devernay. La locomotive actuelle à vapeur. Paris Dunod 1954.
3. I. Trendafilov. Les locomotives à vapeur (en bulgare) Sofia, Technica 1960.
4. P. Verstraete. Expertise sur les possibilités de développement des sources d'énergie dans la République du Zaïre. Rapport final de la mission DP/ZAI/80/007/11-55/32.4.2.
5. S. Syromyatnikov. Les locomotives à vapeur (en russe) Moscou, Transjeldorizdat. 1949.
6. V. Molyartchuk Manuel du mécanicien-thermicien des chemins de fer (en russe). Moscou, Transport 1973.

ANNEXE 1

TYPE MOUNTAIN

SERIE 700

N°	Grandeur	Unité	Valeur
1	Longueur de grille	m	2,295
2	Largeur de grille	m	1,760
3	Surface de grille	m ²	3,98
4	Nombre petits tubes à fumée	-	165
5	nombre gros tubes: à fumée	-	32
6	Dimensions petits tubes	mm	Ø 51 X 5750
7	Dimensions gros tubes	mm	Ø 133 X 5750
8	Surface chauffe foyers	m ²	16,90
9	Surface chauffe tubes	m ²	230,65
10	Surface chauffe total	m ²	247,55
11	Surface de surchauffe	m ²	66,33
12	Timbre chaudière	kg/cm ²	15
13	Poids total à vide	kg	79500
14	Poids total en service	kg	56500
15	Poids par essieu couple	kg	14125
16	Effort de traction $\frac{0,65pd^2}{L}$	kg	11760
17	Nombre de cylindres	-	2
18	Diamètre des cylindres	mm	500
19	Course des pistons	mm	660
20	Diamètre des roues complées	mm	1375

Mise en service

1939 - 1950

ANNEXE 1 (SUITE)

TYPE GARRAT

SERIE 900

N°	Grandeur	Unité	Valeur
1	Longueur de grille	m	2,68
2	Largeur de grille	m	2
3	Surface de grille	m ²	5,360
4	Nombre petits tubes à fumée	-	240
5	Nombre gros tubes à fumée	-	48
6	Dimensions petits tubes	mm	Ø 51 X 45 x 3642
7	Dimensions gros tubes	mm	Ø 140 x 130,5 x 3642
8	Surface chauffe foyers	m ²	22
9	Surface chauffe tubes	m ²	212,9 (côté feu)
10	Surface chauffe total	m ²	234,7
11	Surface de surchauffe	m ²	71
12	Timbre chaudière	kg/cm ²	12,66
13	Poids total à vide	kg	135500
14	Poids total en service	kg	AV. 90900 AR. 94642 185,542
15	Poids adhérent en service	kg	109760
16	Poids par essieu couplé	kg	13720
17	Effort de traction $\frac{0,65pd^2}{D}$	kg	2 X 10100 = 20200 Spote 1/2 pleine 18000
18	Nombre de cylindres	-	4
19	Diamètre de cylindre	mm	483
20	Course des pistons	mm	610
21	Diamètre des roues complètes	mm	1156

Mise en service

1954 - 1955

TABLEAU 2

CALCUL DE LA PRODUCTIVITE D'UNE CHAUDIERE DU TYPE 700

Données initiales

- Surface de grille R		3,98 m ²
- Composition du combustible %	C=39,3 H=4,7 N=0,8	
	O=33,8 W=20 A=1,4	
	S=0	
- Pouvoir calorifique inférieur du combustible Q _i		3200 Kcal/kg
- Taux de combustion Horaire γ		400 kg/m ² h
- Consommation de combustible B _a =Rγ		1592 kg/h
- Temperature de l'air t _a		20 C
- Coefficient d'excès d'air α		1,5
- Teneur en CO		1%
- Surface de foyer H _f		10,90 m ²
- Nombre des tubes à fumée n _{tf}		165
- Diamètres des tubes à fumée d _{tf}		57/46 mm
- Longueur de premier tronçon des tubes-foyer l _{tf} ¹		0,4 m
- Longueur de deuxième tronçon des tubes-foyer l _{tf} ²		5,35 m
- Diamètres de premier tronçon des tubes-foyer d _{tf} ¹		113/105 mm
- Diamètres de deuxième tronçon des tubes-foyer d _{tf} ²		133/125 mm
- Longueur des tubes à fumée l _{tf}		5,75 m
- Nombre des tubes-foyer n _{tf}		32
- Nombre des éléments surchauffeurs n _e		4
- Diamètre d'un élément surchauffeur d _e		35 mm

1. Caractéristique chimique du combustible

$$\beta \approx 2,37 \frac{H - \frac{O}{8}}{C + 0,368} + 0,005 = 2,37 \frac{4,7 - \frac{33,8}{8}}{39,3 + 0,368 \cdot 0} + 0,005 =$$

$$= 0,0336.$$

2. Quantité d'air théorique nécessaire en kg par kg de combustible :

$$L_0 = \frac{1}{23,6} \left(\frac{8}{3} C + 8H + S - O \right) = \frac{1}{23,6} \left(\frac{8}{3} 39,3 + 8 \cdot 4,7 + 0 - 33,8 \right) = 4,6 \text{ kg/kg}$$

3. Quantité d'air participante à la combustion

$$L = 1,546 = 6,9 \text{ kg/kg.}$$

4. Pertes pondérales par l'effondrement et l'entraînement du combustible

$$b_{ef} = \frac{0,8}{4,6 + \sqrt{y}} = \frac{0,8}{4,6 + \sqrt{400}} = 0,0325 \text{ kg/kg;}$$

$$b_{en} = 0,035 \left(\frac{0,8 d L_0 y}{3600} \right)^{1,5} = 0,035 \left(\frac{0,8 \cdot 1,5 \cdot 4,6}{3600} \right)^{1,5} = 0,0648 \text{ kg/kg.}$$

5. Coefficient des pertes par combustion incomplète mécanique

$$\mu = 1 - b_{ef} - b_{en} = 1 - 0,03 - 0,06 = 0,91.$$

6. Pertes par la combustion incomplète mécanique en %

$$q_2^m = 100(1 - \mu) = 100(1 - 0,91) = 9\%.$$

7. Pertes par la combustion incomplète mécanique en kcal/h

$$Q_2^m = Q_i B_n (1 - \mu) = 3200 \cdot 1592 (1 - 0,91) = 458496 \text{ kcal/h.}$$

8. Quantité approximatives des produits de la combustion

$$G = \mu B_n \left[(1 + \alpha L_0) - \frac{A}{100} \right] = 0,91 \cdot 1592 \left[(1 + 6,9) - \frac{44}{100} \right] = 11425 \text{ kg/h.}$$

9. Teneur en CO₂, O₂, N₂ des gaz

$$CO_2 = \frac{79 - [(4,76\alpha - 1) + 0,395] \cdot CO}{(4,76\alpha - 1)(1 + \beta) - (\alpha - 1)} = \frac{1 + 0,395 \cdot 1}{30335 - (1,5 - 1)} = 12,4\%$$

$$O_2 = \frac{(79 + 100\beta)(\alpha - 1) + [(1,485 + 1)]}{(4,76\alpha - 1)(1 + \beta) - (\alpha - 1)} = \frac{(79 + 100 \cdot 0,0335)(1,5 - 1) + [(1,485 + 1)]}{(4,76 \cdot 1,5 - 1)(1 + 0,0335) - (1,5 - 1)} = \frac{5 + 0,395 \cdot 1}{1} = 7,1\%$$

$$N_2 = 100 - CO_2 - CO - O_2 = 100 - 12,4 - 1 - 7,1 = 79,1\%$$

10. Pertes par la combustion incomplète chimique

$$Q_2^{ch} = 56,6C \frac{CO}{CO_2 + CO} \mu B_h = 56,6 \cdot 39,3 \frac{1}{12,4+1} \cdot 0,91 \cdot 1592 = 240485 \text{ kcal/h}$$

11. Temperature de la combustion

$$t_1 = \frac{\sqrt{1 + 4 \frac{E}{G} \cdot \frac{b}{\alpha^2}} - 1}{2 \frac{b}{\alpha}} = \frac{\sqrt{1 + 4 \cdot \frac{4369419}{11425} \cdot \frac{0,00001385}{0,248^2}} - 1}{2 \frac{0,00001385}{0,248}} = 1429^\circ\text{C};$$

$$E = Q_i B_h - Q_2^m - Q_2^{ch} = 3200 \cdot 1592 - 458496 - 240485 = 4369419;$$

$$\alpha = 0,248; \quad b = 0,00001385$$

12. Temperature des gaz à l'entrée des tubes

$$t_2 = (4200 - 600\alpha) \frac{\sqrt{\frac{\mu B_h Q_i}{H_f} + 215}}{\sqrt{\frac{\mu B_b Q_i}{H_f}}} = (4200 - 600 \cdot 0,15) \frac{\sqrt{\frac{0,91 \cdot 1592 \cdot 3000}{16,9} + 215}}{\sqrt{\frac{0,91 \cdot 1592 \cdot 3000}{16,9} + 2000}} = 685^\circ\text{C}$$

13. Quantité de chaleur transmise au foyer

$$Q_f = G[\alpha(t_1 - t_2) + b(t_1^2 - t_2^2)] =$$

$$= 11425[0,248(1429 - 685) + 0,00001385(1429^2 - 685^2)] = 2356028 \text{ kcal/h}$$

14. Coefficient de transmission de chaleur au foyer

$$k_f = 0,4 \left[\frac{\mu B_h Q_i}{H_f} \right]^{0,45} = 0,4 \left[\frac{0,91 \cdot 1592 \cdot 3200}{16,9} \right]^{0,45} = 111,8 \text{ kcal/m}^2\text{h}^\circ\text{C}$$

15. Temperature moyenne des gaz au foyer

$$t_f = \frac{Q_f}{k_f H_f} + t_n = \frac{2356028}{111,8 \cdot 16,9} + 150,5 = 1397^\circ\text{C}$$

$$t_n = 150,5^\circ\text{C} \quad \alpha \quad p_n = 5 \text{ kg/m}^2.$$

16. Section totale des tubes à fumée

$$Q_{\text{taf}} = \frac{\pi}{4} n_{\text{taf}} d_{\text{taf}}^2 = \frac{\pi}{4} 165 \cdot 0,046^2 = 0,274 \text{ m}^2$$

17. Diamètre hydraulique moyen de la section du deuxième tronçon des tubes-foyer

$$d_{\text{htf}}'' = \frac{d_{\text{tf}}^2 - n_e d_e^2}{d_{\text{tf}} + n_e d_e} = \frac{0,125^2 - 4 \cdot 0,035^2}{0,125 + 4 \cdot 0,035} = 0,0419 \text{ m}$$

18. Section totale du deuxième tronçon des tubes-foyer

$$Q_{\text{tf}}'' = \frac{\pi}{4} n_{\text{tf}} (d_{\text{tf}}^2 - n_e d_e^2) = \frac{\pi}{4} 32 (0,125^2 - 4 \cdot 0,035^2) = 0,2694 \text{ m}^2$$

19. Section totale du premier tronçon des tubes-foyer

$$Q_{\text{tf}}' = \frac{\pi}{4} n_{\text{tf}}' d_{\text{tf}}'^2 = \frac{\pi}{4} 32 \cdot 0,105^2 = 0,2769 \text{ m}^2$$

20. Coefficient de proportion des débits des gaz passants par les tubes-foyer et les tubes à fumée

$$\beta = \frac{1}{1 + \sqrt{\frac{1,336 + 0,96C}{a}}} = \frac{1}{1 + \sqrt{\frac{1,33,50 + 0,96 \cdot 1759}{1665}}} = 0,493$$

$$a = \frac{L_{\text{taf}}}{d_{\text{taf}} Q_{\text{taf}}^2} = \frac{5,75}{0,046 \cdot 0,274^2} = 1665$$

$$b = \frac{L_{\text{tf}}'}{d_{\text{tf}}' Q_{\text{tf}}'^2} = \frac{0,40}{0,105 \cdot 0,2769^2} = 50$$

$$c = \frac{L_{\text{tf}}''}{d_{\text{htf}}'' Q_{\text{tf}}''^2} = \frac{5,350}{0,0419 \cdot 0,2694^2} = 1759$$

21. Vitesse des gaz dans les tubes à fumée

$$U_{\text{taf}} = (1 - \beta) \frac{G}{3600 Q_{\text{taf}}} = (1 - 0,493) \frac{11425}{3600 \cdot 0,274} = 5,871 \text{ kg/m}^2 \cdot \text{s}$$

22. Coefficient de transmission de la chaleur aux tubes à fumée

$$k_{\text{taf}} = 5,94 U_{\text{taf}}^{0,9} = 5,94 \cdot 5,871^{0,9} = 29,16 \text{ kcal/m}^2 \cdot \text{h} \cdot \text{C}$$

23. Surface de chauffe des tubes à fumée

$$H_{taf} = \pi d_{taf} n_{taf} L_{taf} = 3,14 \cdot 0,046 \cdot 165 \cdot 5,75 = 137,03 \text{ m}^2$$

24. Temperature des gaz à la sortie des tubes à fumée, trouvée de l'équation

$$\lg \frac{t_2 - t_k}{t_{3taf} - t_k} = \frac{\frac{H_{taf} k_{taf}}{G(1-\beta)} - 2b(t_2 - t_{3taf})}{2,3(\alpha + 2bt_k)}$$

$$t_{3taf} = 187^\circ \text{C}$$

25. Quantité de chaleur, transmise aux tubes à fumée

$$\begin{aligned} Q_{taf} &= (1-\beta)G[\alpha(t_2 - t_{3taf}) + b(t_2^2 - t_{3taf}^2)] = \\ &= (1-0,493)11425[0,248(685-187) + 0,00001385(685^2 - 187^2)] = \\ &= 750108 \text{ kcal/h.} \end{aligned}$$

26. Vitesse des gaz dans le premier tronçon des tubes-foyer

$$U_{tf'} = \beta \frac{G}{3600 \Omega_{tf'}} = 0,493 \frac{11425}{3600 \cdot 0,2769} = 5,65 \text{ kg/m}^2\text{s}$$

27. Coefficient de transmission de chaleur dans le premier tronçon des tubes-foyer

$$k_{tf'} = 5,94 U^{0,925} = 5,94 \cdot 5,65^{0,925} = 30,77 \text{ kcal/m}^2\text{h}^\circ\text{C}$$

28. Surface de chauffe du premier tronçon des tubes-foyer

$$H_{tf'} = \pi d_{tf'} n_{tf'} L_{tf'} = \pi \cdot 0,125 \cdot 32 \cdot 0,4 = 5,024 \text{ m}^2$$

29. Temperature des gaz à la sortie du premier tronçon des tubes-foyer, trouvé par l'équation

$$\lg \frac{t_2 - t_k}{t_A - t_k} = \frac{\frac{H_{tf'} k_{tf'}}{\beta G} - 2b(t_2 - t_A)}{2,3(\alpha + 2bt_k)}$$

$$t_A = 636^\circ \text{C}$$

30. Quantité de chaleur, transmise au premier tronçon des tubes-foyer

$$Q_{tf'} = \beta G [\alpha (t_2 - t_A) + b (t_2^2 - t_A^2)] =$$

$$= 0,493 \cdot 11425 [0,248 (658 - 636) + 0,00001385 (658^2 - 636^2)] =$$

$$= 73477 \text{ kcal/h.}$$

31. Vitesse des gaz dans le deuxième tronçon des tubes-foyer

$$U_{tf''} = \beta \frac{G}{3600 Q_{tf''}} = 0,493 \frac{11425}{3600 \cdot 0,2694} = 5,8 \text{ kg/m}^2\text{s}$$

32. Coefficient de transmission de la chaleur dans le deuxième tronçon des tubes-foyer

$$k_{tf''} = 5,94 U^{0,995} = 5,94 \cdot 5,8^{0,995} = 31,54 \text{ kcal/m}^2\text{h}^\circ\text{C}.$$

33. Surface de chauffe du deuxième tronçon des tubes-foyer

$$H_{tf''} = \pi d_{tf''} n_{tf''} l_{tf''} = 3,14 \cdot 0,125 \cdot 32 \cdot 5,35 = 67,19 \text{ m}^2$$

34. Temperature des gaz à la sortie du deuxième tronçon des tubes-foyer, trouvée par l'équation

$$\lg \frac{t_A - t_K}{t_{3tf''} - t_K} = \frac{\frac{H_{tf''} k_{tf''}}{G} - 2b(t_A - t_{3tf''})}{2,3(\alpha + 2bt_K)}$$

$$t_{3tf''} = 390^\circ\text{C}$$

35. Quantité de chaleur transmise au deuxième tronçon des tubes-foyer

$$Q_{tf''} = \beta G [\alpha (t_A - t_{3tf''}) + b (t_A^2 - t_{3tf''}^2)] =$$

$$= 0,493 \cdot 11425 [0,248 (636 - 390) + 0,0000138 (636^2 - 390^2)] =$$

$$= 363247 \text{ kcal/h.}$$

36. Productivité totale de la chaudière

$$Q_K = Q_f + Q_{taf} + Q_{tf'} + Q_{tf''} =$$

$$= 2356028 + 750108 + 73477 + 363247 = 3542860 \text{ kcal/h}$$

37. Rendement brut de la chaudière

$$\eta_k = \frac{Q_k}{\mu B_n Q_i} = \frac{3542860}{0,94 \cdot 1592 \cdot 3200} = 76,4\%$$

38. Productivité de la chaudière en kg de vapeur : de la i-s
diagramme 1 kg de vapeur à 5 kg/cm² et à 150,5 C contient 656,95 kcal
Alors

$$D_k = \frac{Q_k}{I_k} = \frac{3542860}{656,95} = 5393 \text{ kg.}$$

