



Modélisation de l'atténuation au sol de la concentration des émissions d'une centrale thermique diesel

Abdoulaye Ouédraogo* et Armand G. Sodr 

*Unité de formation et de recherche en sciences exactes et appliquées,
Université de Ouagadougou, 03 BP 7021 Ouagadougou, Burkina Faso*

(Reçu le 26 Avril 2006, accepté le 18 Décembre 2006)

* Correspondance, courriel : abdoulay@univ-ouaga.bf

Résumé

On rapporte dans cet écrit, la conception d'un modèle de mitigation de polluants à trois étapes, afin de contrôler la pollution atmosphérique caus e par une Centrale thermique de 44 MW située à Ouagadougou. On met pour cela en œuvre un audit environnemental qui a conclu à la nécessité d'une réhabilitation de l'installation afin d'améliorer ses performances et réduire la pollution. Pour que cette opération soit effective cependant, les calculs montrent que la consommation spécifique de la Centrale réhabilitée ne doit pas dépasser 229 g/kWh. On construit enfin à la troisième étape, des abaques de dispersion qui permettent de fixer les hauteurs des cheminées pour lesquelles les concentrations des polluants rejetés respectent les normes de qualité de l'air ambiant. Les résultats de ce modèle pourraient ainsi être utilisés pour la prévention et le contrôle de la pollution atmosphérique.

Mots-clés : *Pollution de l'air, moteur diesel, centrale thermique, modèle de mitigation, hauteur de cheminée, Ouagadougou.*

Abstract

A ground level diesel power plant pollutants mitigation model

A three steps environmental mitigation model is investigated as a way of controlling the emission rates of a 44 MW diesel electric power plant located in downtown Ouagadougou. First of all, an environmental audit finds it necessary to rehabilitate the plant in order to improve its performances. To be effective however, the upper limit of the plant fuel consumption should not exceed 229 g/kWh. Finally, dispersion diagrams are obtained from a simplified dispersion-advection submodel, capable of predicting the plant stack high for which, the ground level pollutant concentrations must comply with the ambient air quality standards. Thus, the results of this model may be utilized to control and regulate air pollution.

Keywords : *Air pollution, diesel power plant, mitigation model, energy management, stack high, Ouagadougou.*

Nomenclature

- C_{spcre} : Consommation spécifique de la Centrale réhabilitée, kg/(kWh)
 C_{spcnre} : Consommation spécifique de la Centrale non réhabilitée, kg/kWh
 C_{sa} : Consommation annuelle, (kg)
 C_{sp} : Consommation spécifique, (kg de carburant/kWh)
 H : Hauteur de cheminée, (m)
 P_f : Pouvoir fumigène réel, (kg de polluant par kg de combustible)
 PRP : Pourcentage de Rabattement de Polluant, (%)
 PT : Production Thermique, (kWh)
 q : Débit massique de polluant, (kg/s)
 Q : Puissance d'émission de la source, (kg)
 Q_{ap} : Quantité annuelle de polluant, (kg)
 RP : Rabattement de Polluant, (kg)
 T : Température de l'écoulement, (°C)
 U : Vitesse Axiale de l'écoulement, (m/s)
 V : Vitesse de l'écoulement, (m/s)

1. Introduction

Dans la première partie des investigations [1], il a été d'abord quantifié à l'aide d'un Testoterm 350, les rejets bruts de la Centrale Thermique Diesel Ouaga II, la plus grande Centrale située en plein cœur de la capitale Ouagadougou. En comparant ces émissions avec les normes nationales de qualité de l'air, il est ressorti que la Centrale pollue fortement l'environnement, mettant sérieusement en danger la santé des populations. Dans la deuxième partie des investigations présentées ci-après, nous concevons un modèle de mitigation efficace et peu coûteux à trois étapes dont l'objectif est de faire en sorte que les concentrations des polluants au sol soient conformes aux normes de qualité de l'air en vigueur. Pour cela, nous mettons en œuvre en premier lieu un audit environnemental basé sur l'évaluation des performances réelles de la Centrale, puis nous appliquons un plan de réhabilitation comme moyen de contrôler et de réduire les émissions; finalement, à la troisième étape, nous dimensionnons les cheminées de la Centrale de manière à ramener définitivement les taux de concentration au sol en conformité avec les normes de qualité de l'air.

2. Qualité de l'air atmosphérique et les normes nationales de rejets

L'air atmosphérique est un mélange d'azote (78.08 %) et d'oxygène (20.95 %) avec des traces de gaz rares tels l'argon (0.93 %). Il contient en plus de la vapeur d'eau (0 à 4 %) du gaz carbonique (0.03 %) et des traces de 40 autres gaz dont l'ozone, l'hélium, l'hydrogène, les oxydes d'azote et de soufre et du néon. On compte en outre, des suspensions diverses de particules solides ou liquides appelées aérosols dont des particules neutres telles les poussières provenant surtout des vents et des éruptions volcaniques ou encore de l'industrie, et des particules provenant de la matière condensée telles les substances hygroscopiques comme l'acide sulfurique, les oxydes d'azote, ... Ainsi, aucune

composition absolue ne peut être définie, l'air atmosphérique étant toujours plus ou moins pollué. Par conséquent, les normes de qualité de l'air ne peuvent être que relatives et définissent donc un ensemble de concentrations de polluants jugés acceptables par une communauté donnée. Concrètement, cela revient à fixer pour tout ou partie des polluants, des plages ou limites supérieures de concentrations à ne pas dépasser, de manière à contrôler leur impact sur la santé humaine en particulier et sur l'environnement en général. Il existe en gros deux types de normes de rejets atmosphériques, celles relatives aux taux d'émission aux cheminées et celles ayant trait aux concentrations au sol, directement liées-elles à la qualité de l'air, **Tableau 1**.

Tableau 1: Normes de qualité de l'air ambiant [2]

Substance	Valeurs limites	Durée de la période de mesure
CO	30 µg/m ³	Moyenne sur une heure
SO ₂	200 à 300 µg/m ³	Moyenne sur une heure
NO ₂	170 µg/m ³	Moyenne sur une heure
Particules	200 à 300 µg/m ³	Moyenne sur une heure
Plomb (Pb)	2 µg/m ³	Moyenne sur une heure

3. Modélisation de l'atténuation des taux de concentrations au sol

Étape 1 : Audit sur les performances de la Centrale

L'audit a pour objectif de comparer les résultats effectivement atteints, avec les spécifications du constructeur. Il faut comparer en particulier les consommations spécifiques et les taux d'émission et analyser le système de gestion environnementale en vigueur à la Centrale. La finalité de

l'audit est, soit de tracer des pistes de nature à réhabiliter la Centrale existante, soit de proposer son renouvellement complet. Des études d'impact sont indispensables dans les deux cas et devront être qualitatives et quantitatives avec pour axes généraux, des descriptions physiques, biologiques et socioéconomiques du site, accompagnées de bilans d'impacts actuels et futurs et finalement, des suggestions de mesures de mitigation. Ainsi, le constat suivant est fait :

Sur le plan physique, la Centrale est située en plein cœur de Ouagadougou, ce qui accroît considérablement les risques environnementaux pour les populations. A long terme, il faut envisager sa délocalisation.

Sur le plan biologique, il n'existe aucune zone de biodiversité à préserver à proximité du site. Néanmoins, une analyse des eaux usées révèle une présence de substances toxiques faites surtout d'hydrocarbures et de lubrifiants, directement rejetés dans la nature. Les fouilles indiquent en effet des pollutions de sol atteignant des profondeurs de 3 à 4 m [3]. Pour la dépollution, il est préconisé des mesures simultanées de décantation par filtration physico-chimique.

Sur le plan socioéconomique, il a été noté que les organismes des agents chargés des relevés subissaient en moyenne des variations de température de 30°C par heure. En outre en 2002, le facteur de puissance annuelle était de 42 %, ce qui révèle une très faible production thermique occasionnant ainsi un manque à gagner financier important.

Sur le plan de l'efficacité énergétique et des rejets atmosphériques, les données disponibles à la même période indiquent que la consommation spécifique a subi un accroissement de 13.20 % par rapport aux spécifications du constructeur, ce qui a eu pour conséquence, une consommation supplémentaire de plus de 3 millions de kg de combustible et occasionné des excédents de rejet contenus dans le Tableau ci-dessous.

Tableau 2 : *Excédents de rejet par rapport aux spécifications du constructeur*

Excédents de rejets atmosphériques en 2002 (kg)				
CO ₂	CO	NO	SO ₂	NO ₂
18 063 856.80	66 388.50	313 453.30	11 797.90	2 915.80

Il faut souligner enfin que l'âge moyen des Groupes est de 26 ans [1], le plus vieux fonctionnant depuis plus de 30 ans.

En conclusion, la plupart des Groupes ont besoin d'être remplacés, mais face aux coûts, nous préconisons à court terme d'améliorer leurs performances puis de dimensionner les cheminées afin de respecter les normes de qualité de l'air.

Étape 2 : Optimisation des performances

Toute opération de réduction des émissions doit nécessairement passer d'abord par l'optimisation continue des performances des Groupes en assurant une meilleure transformation de l'énergie de combustion en puissance utile disponible au bout de l'arbre principal du moteur. Il faut en effet réduire les différentes pertes que sont : les pertes thermodynamiques causées par les irréversibilités surtout lors des compressions-détentes, les pertes mécaniques qui sont dues aux forces d'inertie et de frottement des diverses pièces mécaniques en mouvement réciproque et enfin, la puissance utilisée dans l'entraînement des auxiliaires. Les conséquences directes seraient une baisse de la consommation spécifique qui se trouve être directement liée à la quantité de polluant déversé dans l'environnement, selon les formules suivantes :

$$Q_{ap} \text{ (kg de polluant)} = P_f \text{ (kg de polluants/kg comb.)} \times C_{sa} \text{ (kg comb.)} \quad (1)$$

$$C_{sa} \text{ (kg de combustible)} = C_{sp} \text{ (kg/kWh)} \times PT \text{ (kWh)} \quad (2)$$

$$RP = [C_{spcnre}] \times [(P_f)_{réel}]_{cnre} - [C_{spcre}] \times [(P_f)_{réel}]_{cre} \quad (3)$$

$$PRP (\%) = \frac{P_{cnre} - P_{cre}}{P_{cre}} \times 100 \quad (4)$$

En exemple, *la Banque Mondiale* [4] estime que les performances thermiques de la Centrale réhabilitée doivent croître d'au moins 25 % par rapport à leurs valeurs avant réhabilitation, tandis que les émissions, (autres que les particules et SO₂) doivent connaître une réduction d'au moins 25 % par rapport à leur niveau de référence. En utilisant les formules précédentes et faisant appel aux relations classiques de performances des Moteurs à Combustion Interne, on constate après calculs que la première mesure impose en fait que la consommation spécifique de la Centrale réhabilitée soit au mois inférieure à 229 g/kWh, ce qui se traduirait par une économie de carburant au mois supérieure à un milliard de kg de combustible et à une diminution de la pollution indiquée par le **Tableau 3**.

Tableau 3 : *Abattement (%) de polluants de la Centrale Réhabilitée*

Abattement (%) d'émissions de polluants de la Centrale Réhabilitée				
CO ₂	CO	NO	NO ₂	SO ₂
0.95	0.040	0.045	0.043	0.12

Pour les polluants autres que les particules, le pourcentage de réduction des polluants (PRP) doit se conformer à la relation suivante :

$$PRP (\%) = \frac{P_{cnre} - P_{cre}}{P_{cre}} \times 100 \geq 25 \% \quad (5)$$

En conclusion, l'augmentation des performances énergétiques et environnementales par la technique d'optimisation des performances est réelle et à la portée de toute équipe de gestion, parce que correspondant beaucoup plus à des investissements en ressources humaines qu'à des investissements plus chers en équipements. Les avantages sont multiples : méthodes applicables sans conditions, réduction nette de la pollution, économie de devises, longue durée de vie des équipements et

au total enfin, une réduction locale et globale de la pollution.

Étape 3 : Dimensionnement des cheminées

Il a été observé que deux aspects importants sont à prendre en compte en matière de qualité de l'air: Les normes de rejet à la sortie des cheminées et la concentration des polluants au niveau du sol. Il n'existe pas de relations simples entre les valeurs de ces deux normes à cause des influences des conditions météorologiques (régimes de vent, stabilité de l'air, température ambiante etc.) et la topographique du milieu, sur les phénomènes de dispersion des polluants rejetés en un endroit donné. De plus, à de tels rejets se superposent très souvent, beaucoup d'autres sources d'émission plus ou moins importantes qui peuvent, elles aussi, influencer sur les opérations de contrôle des normes au sol. Néanmoins, la cheminée reste l'un des dispositifs les plus simples mais efficaces pour réduire les concentrations de polluants au sol.

Ainsi dans cette partie du modèle, il s'agit de déterminer à la suite des précédentes techniques de réduction, une hauteur optimale qui, en plus d'évacuer et rejeter les gaz le plus haut possible, doit être telle que, les concentrations de polluants au sol restent dans les limites prescrites par les normes de qualité de l'air en vigueur. Pour cela, il faut connaître :

- a) la topographie du milieu
- b) les régimes de vent
- c) les concentrations de polluants à la sortie des cheminées
- d) les normes de qualité de l'air ambiant applicables
- c) les autres sources de pollution à proximité de la Centrale
- e) les pertes de charges totales lors des rejets.

Malheureusement, les seules données disponibles sont les rejets aux cheminées et les normes de qualité de l'air. Notons qu'à la différence de la réduction par l'augmentation des performances, cette technique réduit la concentration des polluants seulement au niveau local.

État physique et sous-modèle de la dispersion des polluants

L'état physique d'une cheminée est équivalent à une source immobile de polluants, de puissance Q (kg), émettant continuellement dans l'espace. Les polluants émis, sont simultanément transportés et dispersés de plus en plus loin de la source en fonction des conditions atmosphériques et de la topographie de la zone de dispersion. Ainsi, à chaque instant (t) et en tout point (x, y, z) de l'espace autour de la source, les polluants sont présents à une concentration qui dépend à la fois de la direction de dispersion et du temps considéré. Le problème du contrôle de la pollution se ramène donc à s'assurer qu'en tout point de l'espace vitale, la concentration des polluants est inférieure ou égale aux normes prescrites. Pour cela, Connaissant le débit de la source, généralement à travers des mesures et considérant que son origine coïncide avec celle d'un repère trirectangle, cartésien et direct de l'espace ($0, x, y, z$), on note la concentration cherchée, $C(x, y, z, t)$. Les équations générales de dispersion-advection des polluants [5,6] en écoulement laminaire s'écrivent :

Équation de conservation de masse

$$\frac{\partial C}{\partial t} = D \nabla^2 C - (\mathbf{V} \cdot \nabla) C + D_p \Phi(p) + D_T \Phi(T) \quad (6)$$

Équation de Navier Stocks

Considérons pour simplifier, le cas incompressible avec des propriétés de transport constantes.

$$\rho \frac{D\mathbf{V}}{Dt} = \rho \mathbf{g} - \nabla p + \mu \nabla^2 \mathbf{V} \quad (7)$$

Équation de conservation de l'énergie

$$\rho c_v \frac{DT}{Dt} = k \nabla^2 T + \varphi \quad (8)$$

Où φ est la fonction de dissipation. L'équation (6) exprime le fait que le transport de polluants est causé simultanément par les gradients de concentration $C(x, y, z, t)$, de pression $D_p \Phi(p)$ et de température

$D_T \Phi(T)$ ou effet de Soret, ceux liés aux forces de gravitation étant négligés. $V(x, y, z, t)$ est le vecteur vitesse de l'écoulement et D le coefficient de diffusion.

Dans le cas général cependant, le régime est turbulent, et l'équation (6) s'écrit sous la forme complexe suivante en retenant seulement l'effet de Soret :

$$\frac{\partial C}{\partial t} = \left[\frac{\partial}{\partial x} (\varepsilon_x \frac{\partial C}{\partial x}) + \frac{\partial}{\partial y} (\varepsilon_y \frac{\partial C}{\partial y}) + \frac{\partial}{\partial z} (\varepsilon_z \frac{\partial C}{\partial z}) \right] - \mathbf{u} \frac{\partial C}{\partial x} + \mathbf{v} \frac{\partial C}{\partial y} + \mathbf{w} \frac{\partial C}{\partial z} + \overline{\Phi(T)} \quad (9)$$

Où ε est appelé viscosité turbulente, simplement en analogie avec son équivalent moléculaire et $\overline{\Phi(T)}$ la dépendance turbulente en température. Les équations ci-dessus sont non linéaires et pour leur résolution, il faut d'abord déterminer le champ d'écoulement des vents à partir des données météorologiques puis par approximations numériques de l'équation de Navier Stocks, déterminer ensuite le profil des températures puis finalement calculer la dispersion $C(x, y, z, t)$ des polluants.

Hypothèses simplificatrices

En général, la viscosité turbulente ε est une fonction complexe des variables d'espace. Ignorons ce fait et faisons les hypothèses simplificatrices suivantes : ε est pris constant et considérons un vent dominant au sol (l'Harmattan par exemple) de direction x , de sorte que la composante utile de la vitesse $V(x, y, z, t)$ soit constante et égale à U . L'équation (9) s'écrit alors lorsqu'on néglige également l'influence de l'effet de Soret :

$$\frac{\partial C}{\partial t} + U \frac{\partial C}{\partial x} = \varepsilon_x \frac{\partial^2 C}{\partial x^2} + \varepsilon_y \frac{\partial^2 C}{\partial y^2} + \varepsilon_z \frac{\partial^2 C}{\partial z^2} \quad (10)$$

L'équation (10), qui ne prend finalement en compte que le gradient de concentration des polluants, est classique et rappelle l'équation de conduction de la chaleur avec une source animée d'une vitesse U le long

de l'axe x. Sa solution analytique est connue et donnée par la relation suivante [7,8] :

$$C(x, y, z, t) = \frac{Q}{(2\pi)^{3/2} \sigma_x \sigma_y \sigma_z} \exp\left[-\frac{(x-Ut)^2}{2\sigma_x^2} - \frac{y^2}{2\sigma_y^2} - \frac{z^2}{2\sigma_z^2}\right] \quad (11)$$

Les déviations standards (σ_x , σ_y , et σ_z), sont déterminées par une approche statistique en décrivant l'écoulement par l'entremise de régimes de vitesses telles que les composantes ($U+u$, v , w) fluctuent autour du régime permanent (U , 0 , 0), *Egbert Boeker et al.* [8]. Intégrant ensuite l'équation (11) par rapport au temps, on obtient une solution exacte de la forme :

$$C(x, y, z) = \frac{q}{(2\pi)^{3/2}} \int_0^\infty \exp\left[-\frac{(x-Ut')^2}{2\sigma_x^2} - \frac{y^2}{2\sigma_y^2} - \frac{z^2}{2\sigma_z^2}\right] \frac{dt'}{\sigma_x \sigma_y \sigma_z} \quad (12)$$

Négligeant la diffusion dans le sens de l'écoulement, la solution exacte de l'équation (12) est obtenue comme suit [7,8] :

$$C(y, z) = \frac{q}{2\pi\sigma_y\sigma_z U} \exp\left(-\frac{y^2}{2\sigma_y^2} - \frac{z^2}{2\sigma_z^2}\right) \quad (13)$$

Appliquons à présent cette équation au cas spécifique d'une cheminée de direction z ascendante et de coordonnées (0, 0, H). Notons en plus que lorsqu'il y a réflexion totale des polluants, le cas supposé ici, il faut superposer à la source réelle, une source fictive symétrique de la réelle et de coordonnée (0, 0, -H), si bien que la concentration totale en un point donné est la somme des deux :

$$C(y, z) = \frac{q}{2\pi\sigma_y\sigma_z} \left[\exp\left(-\frac{y^2}{2\sigma_y^2} - \frac{(z-H)^2}{2\sigma_z^2}\right) + \exp\left(-\frac{y^2}{2\sigma_y^2} - \frac{(z+H)^2}{2\sigma_z^2}\right) \right] \quad (14)$$

Dans le cas pratique cependant, on est surtout intéressé par les concentrations des polluants au sol. Elles sont obtenues en faisant $z = 0$ dans l'équation (14) :

$$C(y) = \frac{q}{\pi U \sigma_y \sigma_z} \exp\left(-\frac{y^2}{2\sigma_y^2} - \frac{h^2}{2\sigma_z^2}\right) \quad (15)$$

Pour la Centrale, la plus grande concentration se trouvera au pied de la cheminée, c'est à dire en faisant $y = 0$ dans l'équation (15). On a finalement :

$$C = \frac{q}{\pi U \sigma_y \sigma_z} \exp\left(-\frac{H^2}{2\sigma_z^2}\right) \quad (16)$$

Remarquons [8], qu'une relation simple peut être trouvée entre les variables de l'équation (16) en posant : $a = \sigma_y/\sigma_z$ puis en construisant la courbe :

$$\frac{aCUH^2}{q} = f(\sigma_z/H) \quad (17)$$

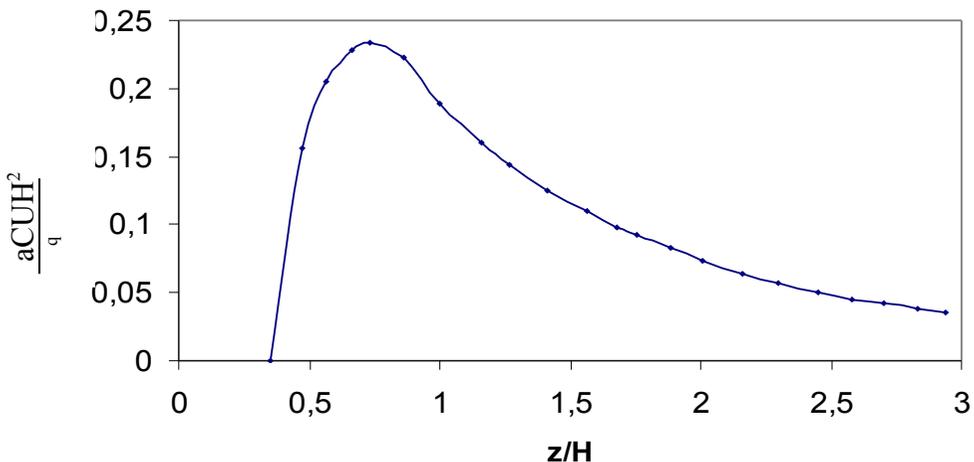


Figure 1 : *Corrélation de la concentration maximum des polluants*

Cette courbe indique que le maximum de l'ordonnée égal à 0.23 est obtenu pour une abscisse de 0.707. Ainsi, la relation suivante peut être déduite :

$$a C_{\max} UH^2 / q = 0.23 \quad (18)$$

On peut tirer de (18), soit la concentration maximum au pied de la Centrale C_{\max} soit la Hauteur H de la cheminée, les autres grandeurs étant données.

Hypothèses sur les régimes de vent

Les différentes mesures météorologiques indiquent que les régimes de vent sont généralement faibles (entre 3 et 5 m/s) au Burkina à l'exception des tornades et des orages. Pour ce modèle, nous prendrons trois régimes types de vitesses comprises respectivement entre 2 et 3 m/s (cas défavorable), 3 et 5 m/s (vents d'harmattan) et 6 m/s (cas favorable) pour représenter toutes les possibilités. Par ailleurs, nous supposons l'insolation moyenne comme forte pour fixer les déviations standards σ_y , et σ_z liées à chaque type de régime.

Concentrations de polluants au sol pour une hauteur économique H

Cette situation est celle en vigueur actuellement à la Centrale où lors de l'installation des Groupes, il n'a été tenu compte que de l'aspect économique pour le choix de la hauteur des cheminées. Le principe de calculs est le suivant: Déterminer d'abord les débits de rejet q aux cheminées partant des normes nationales relatives aux NOx et aux particules. Puis selon la vitesse U des vents et le coefficient (a), on fait appel à l'équation (18) pour déterminer la concentration maximum de polluants au sol $C_{\max i}$ où i indique le polluant considéré.

Les résultats sont présentés dans le **Tableau 4**. En faisant le rapport $C_{\max i}/C_{oi}$ où C_{oi} est la norme de qualité de l'air ambiant, on constate d'abord comme prévu, le rôle de dispersion que joue le vent. Ensuite, seuls les polluants SO₂ et les particules respectent les normes de qualité de l'air. Par contre, les populations et l'environnement sont constamment exposés aux impacts des deux autres polluants que sont, le CO, gaz toxique inodore et les NOx qui jouent un rôle important dans la formation de smogs et interviennent également dans la contamination par les pluies acides.

Tableau 4 : Concentrations de polluants au sol pour une hauteur H de 20 m

Année d'exploitation : 2002						
Moyenne de l'insolation : forte						
Déviations standard à 100 m autour de la cheminée [8]						
Hauteur = 20 m						
Vents : 2 à 3 m/s $\sigma_y = 20$ m $\sigma_z = 12$ m		Débits de rejets q (kg/s) aux cheminées	Vents : 3 à 5 m/s $\sigma_y = 16$ m $\sigma_z = 11$ m		Vents: 6 m/s $\sigma_y = 12$ m $\sigma_z = 7$ m	
Concentration (kg/m ³) au sol	% C_{max}/C_o		Concentration (kg/m ³) au sol	% C_{max}/C_o	Concentration (kg/m ³) au sol	% C_{max}/C_o
CO = 4.50×10^{-7}	15	3.25×10^{-3}	CO = 3.21×10^{-7}	10	CO= 1.82×10^{-7}	6
SO ₂ = 3.16×10^{-8}	0.12	2.29×10^{-4}	SO ₂ = 2.26×10^{-8}	0.09	SO ₂ = 1.28×10^{-8}	0.05
NO ₂ = 2.2×10^{-6}	13	0.016	NO ₂ = 1.58×10^{-6}	9	NO ₂ = 8.94×10^{-7}	5
Particules = 7.16×10^{-8}	0.28	5.19×10^{-4}	Particules = 5.13×10^{-8}	0.20	Particules = 2.90×10^{-8}	0.12

Dimensionnement de la hauteur H des cheminées

C'est le but recherché à savoir, choisir des hauteurs de cheminées H de sorte à disperser suffisamment les polluants afin que leurs concentrations au sol respectent les normes de qualité de l'air. Pour cela, il faut partir de l'équation (18) que nous réécrivons sous la forme suivante :

$$C_{maxink} = 0.23 q_i / [(aU)_n (H_{ink})^2]$$

Où, i désigne les polluants dans l'ordre: CO, SO₂, NO₂, Particules; n représente les trois régimes de vent et k le nombre d'itérations nécessaires pour que la concentration de chaque polluant (i) au sol respecte les normes de qualité de l'air correspondant à une hauteur H_{in} fixée. Ainsi, pour chaque type de régime de vent n = 1, 2 et 3, on doit satisfaire les relations suivantes :

$$C_{maxin} / C_{oi} \leq 1 \tag{19}$$

$$\text{La Hauteur H cherchée} = (\text{Sup}) [H_{in}] \tag{20}$$

Concrètement, on procède de la manière suivante:

On choisit le polluant CO puis on calcule son débit massique q_1 (kg/s) correspondant [1]. Ensuite, on choisit le régime de vent défavorable $U = 2.50$ m/s et $a = (20/12)$. On procède maintenant aux itérations :

Pour $i = 1$, $n = 1$ et $k = 1$: Donner une valeur arbitraire H_{111} à H .

Calculer $C_{\max 111}$ correspondant, puis estimer le rapport $C_{\max 111} / C_{o1}$

Si cette valeur est inférieure ou égale à 1, on arrête l'opération sinon, on essaie une plus grande valeur de H .

Pour $i = 1$, $n = 1$ et $k = 2$:

Prendre une nouvelle valeur H_{112} supérieure à H_{111} .

On effectue les mêmes calculs que ci-dessus et ainsi de suite jusqu'à satisfaire la relation: $C_{\max 111} / C_{o1} = 1$.

On note la hauteur correspondante cherchée H_{11} .

On procède de la même manière pour les autres régimes avec toujours $i = \text{CO}$:

Pour $i = 1$, avec des vents d'harmattan où $a = (16/11)$ et k ; noter la hauteur optimum correspondante H_{12} .

Pour $i = 1$, $U = 6$ m/s et $a = (12/7)$ et k , la hauteur correspondante est notée H_{13}

On passe maintenant aux autres polluants ($i = 2, 3$ et 4 ; n, k) en répétant les mêmes calculs et consignat les hauteurs optimum recherchées, H_{in} .

En traçant les courbes $H_{in} = f(C_{\max in} / C_{oi})$, on obtient un ensemble d'abaques de dispersion des quatre polluants en fonction des régimes de vent. Pour se conformer aux normes de qualité de l'air ambiant exigées par le législateur, les itérations donnent exactement les hauteurs brutes suivantes mesurées par rapport au niveau du sol:

$H = 116$ m pour des régimes de vent défavorable de 2 à 3 m/s

$H = 95$ m pour des régimes de vent d'harmattan de 3 à 5 m/s

$H = 74$ m pour des régimes de vent favorable de 6 m/s

4. Analyse et discussion des résultats

Les abaques obtenus à partir du modèle simplifié permettent d'analyser la dispersion des polluants de la Centrale et reflètent dans bien des aspects, la réalité physique telle que présentée dans la problématique. En effet, l'imposition d'une direction de vent dominant, tel l'Harmattan, semble logique puisqu'il souffle durant une plus longue période de l'année (octobre à mai). Les polluants étudiés sont ceux ayant fait l'objet de limitation de concentration par le Code de l'environnement [2].

Abaques de dispersion des polluants en fonction des régimes de vent

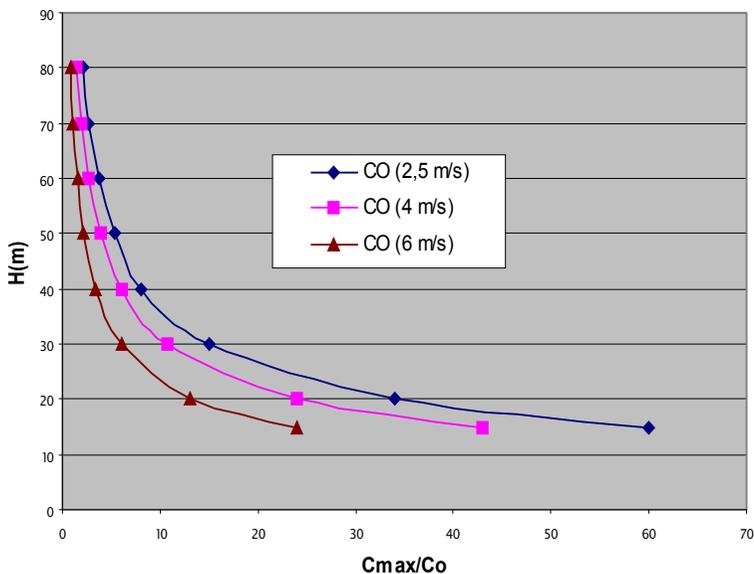


Figure 2: Dispersion de CO en fonction des régimes de vent

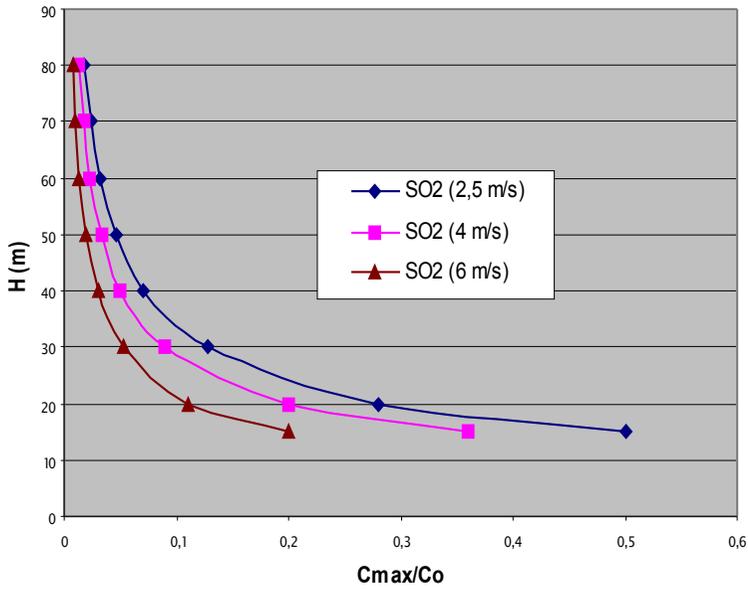


Figure 3: Dispersion de SO₂ en fonction des régimes de vent

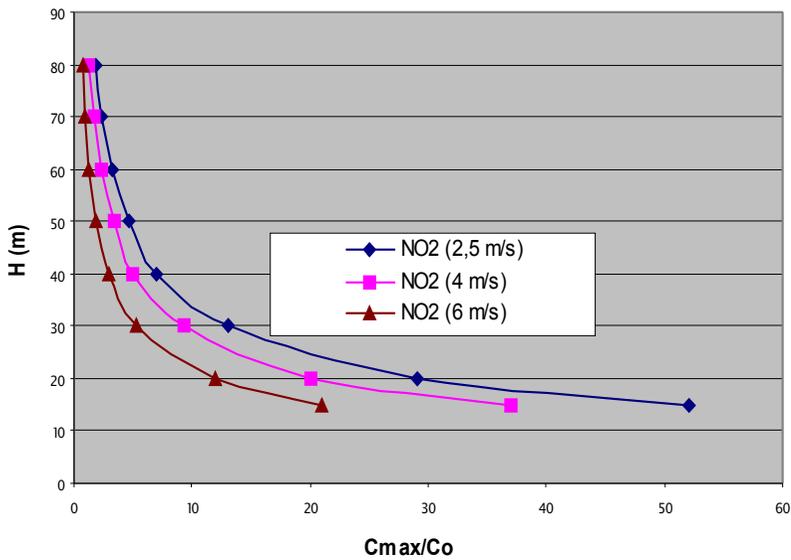


Figure 4 : Dispersion de NO₂ en fonction des régimes du vent

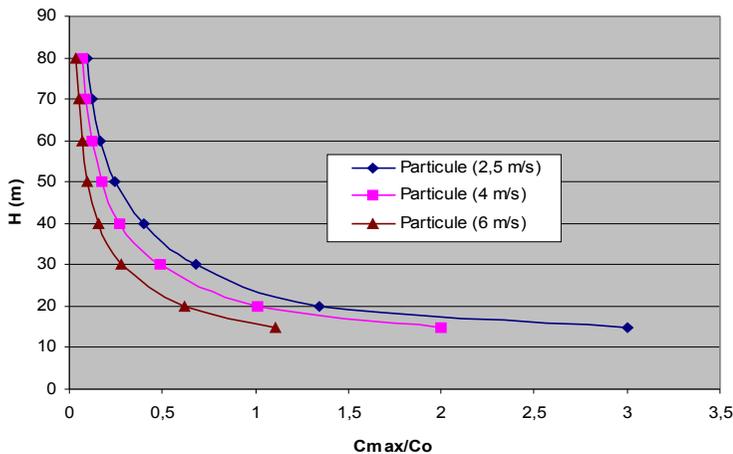


Figure 5 : Dispersion des particules en fonction des régimes de vent

Les courbes portent sur les rejets de l'année 2002 où il est mis clairement en évidence le rôle de dispersion des vents. Quant aux hauteurs des cheminées, elles sont dépendantes des concentrations au sol des NOx et de CO, les deux autres polluants étant sans danger à partir de 25 m. La dispersion est en effet meilleure pour des vitesses élevées de vent, nécessitant seulement des cheminées de hauteur moyenne. Par contre, des vents faibles dépendront de longues cheminées pour les mêmes résultats. Les références [9,10] relatives à la prévention de la pollution atmosphérique en France et en Belgique et donc de fait en Europe, utilisent la formule suivante :

$$C_m = [kq/(H)^2] [R\Delta T]^{-1/6} \quad (21)$$

Où les grandeurs sont les mêmes exceptées R et ΔT qui sont respectivement le débit des gaz en m^3/h et la différence de température en Kelvin au débouché de la cheminée et la température moyenne annuelle de l'air ambiant. Une comparaison des résultats aurait été possible si ces deux grandeurs avaient été mesurées; aux besoins, la valeur de k obtenue ici par pure extrapolation mathématique, aurait pu être corrigée en fonction des données expérimentales de 340 et 680 respectivement pour les polluants gazeux et les poussières. Les références [10,11] elles, fournissent des formules de corrections dues

aux obstacles, la dernière présente même un schéma illustratif. Quant aux agences locales de protection de l'environnement des états de Ohio et du Kansas aux USA [12,13], elles utilisent les formules suivantes :

$$H_g = 2.5 H \text{ Ou } H_g = H + 1.5 L \quad (22)$$

La première formule est valable pour les cheminées construites à la date de 12 janvier 1979, la seconde pour les autres cas. H_g est dit obtenu à partir de « bonnes pratiques d'ingénieur », H hauteur de(s) structure(s) avoisinante(s) et L l'altitude du point caractéristique de l'obstacle. Ses formules apparemment simples sont cependant accompagnées d'une série de conditionnalités pas d'ailleurs toutes corroborées par l'agence Américaine de Protection de l'Environnement (EPA). Compte tenu de l'altitude généralement basse des habitations autour de la Centrale, cette formule semble être inappropriée puisqu'il a été montré qu'une hauteur de 20 m était insuffisante pour disperser tous les polluants émis.

Pour les pertes de charges, les corrections suivantes sont proposées par la référence [14] pour des moteurs de puissance inférieure à 20 MW.

$$H = H_b [1 - (V - 25)/(V-5)] \quad (23)$$

Où H_b est la hauteur brute pour des moteurs de puissances comprises entre 2 et 20 MW, consommant autres combustibles que du gaz naturel ou du gaz de pétrole liquéfié; V est la vitesse d'éjection des gaz. En cas de dual fuel, il est indiqué de majorer H_b de 20 %. La mesure de V aurait définitivement permis d'abord de calculer les pertes de charge par les voies classiques puis par la formule ci-dessus, la Centrale Ouaga II étant composée de neuf (9) Groupes dont les plus puissantes sont de 6 MW.

En résumé, il serait intéressant de comparer toutes ces données pour se faire une idée précise des limites d'applicabilité de chacune en fonction des conditions locales. En l'absence de mesures expérimentales sur la température des fumées et de leur vitesse au sortir de la cheminée, aucun chiffre exact de correction ne peut être retenu. Ajoutons toutefois que la baisse des émissions suite à l'augmentation des performances doit se traduire par une baisse de la hauteur des cheminées. De plus, celles-ci ne sont pas construites à partir du niveau du sol mais sont raccordées à la sortie des collecteurs de fumées des Groupes [1], ce qui

réduit leur hauteur effective. Résumons enfin dans le tableau ci-dessous, les avantages/inconnaitances et tendances des coûts du modèle de mitigation.

Tableau 5 : *Analyse des tendances et coûts du modèle de mitigation*

Modèle de mitigation	Avantages / Inconvénients	Tendances / Coûts
1 ^{ère} Étape Audit énergétique et environnemental En rapport avec les performances réelles des Groupes, respect des normes (énergétiques, rejets, bien être des ouvriers, insécurités) et de la santé financière de l'institution.	Étape indispensable, avantages : permet de situer exactement l'état réel de l'installation et d'en dégager les deux tendances : réhabilitation ou remplacement complet des équipements. La réhabilitation a été choisie ici.	Due à la vétusté des Groupes et à la complexité du travail (dépollution des sols, évacuation des eaux usées), les coûts pourraient être élevés.
2 ^{ème} Étape Réhabilitation (remplacement de pièces usées, rééquilibrage des moteurs) puis révision générale et mise en place d'un système de maintenance et de suivi évaluation, résultats immédiats.	Indispensables / Avantages : amélioration des performances / augmentation du rendement thermique/ baisse de la consommation spécifique/ baisse des émissions / baisse la hauteur des cheminées.	Nettement moins cher que le renouvellement. Réduirait les frais de fonctionnement et la hauteur des cheminées et donc les coûts.
* Kit de mesures et de contrôle des rejets	Indispensable pour la gestion environnementale	Très modérés 5 000\$ US (2000) [15]
* Kit de mesures et contrôle du bruit	Sécurité des employés et des moteurs	Très modérés 50 000\$ US (2000) [15]
* Traitement des eaux et de la boue industrielle	Indispensable pour la gestion environnementale/dépollution des sols	Très modérés 50 000\$ US (2000) [15] Pour la boue
Méthodes directes de traitement * Système d'injection	Réduction des NOx : difficile à incorporer à de vieux moteurs – pas recommandé	Peut être très élevés
• Méthodes de traitements catalytiques •	Difficile à incorporer à de vieux moteurs – pas recommandé	Peut être très élevés
3 ^{ème} Étape : Dimensionnement de la hauteur des cheminées	Indispensable : meilleure dispersion des polluants/ réduction des bruits	Modérés / fonction de la hauteur : 600 000 \$ US (2000) pour H = 60 m [15]

Les coûts liés à ces éventuelles modifications sont évalués à environ 3.6×10^6 \$ US (constant 2000) [15] pour les cheminées seulement, sans inclure la facture des révisions/maintenances et des kits de mesure qui vont ajouter une somme supplémentaire de 170 000 \$ US (constant 2000) [15]. Ces montants sont peut être élevés, mais sont certainement très modestes comparés à ce que l'institution devrait déboursier de suite pour le renouvellement complet des équipements. Cependant, à long terme et à travers une planification rigoureuse, la Centrale doit être délocalisée et remis à neuf, les vieux Groupes pouvant être retenus pour servir de puissance d'appoint aux heures de grande consommation. Pour cela il suffirait de les faire fonctionner en même temps que les moteurs performants rejetant des polluants en dessous des limites prescrites. Cette hypothèse nous semble en définitive la plus viable.

5. Conclusion et perspectives

Le montant final des investissements serait certainement plus élevé que les 4 millions de dollars US (constant 2000) estimés, si l'on tient compte d'une part de l'inflation et d'autre part de l'ensemble des coûts des différents segments du modèle. Néanmoins, ce montant reste certainement nettement en dessous de ce qu'aurait représenté, celui d'un renouvellement complet des Groupes ou encore et surtout celui incluant des mesures directes de mitigations telles les méthodes catalytiques ou à injection de vapeur. Non seulement, le coût du modèle est supportable, mais il est également réalisable sans modifications majeures. Le modèle représente donc pour tous les pays comme le Burkina qui ne sont pas soumis à des mesures de réduction de rejet, un moyen simple et efficace pour la production d'énergie propre pour un développement durable. De meilleurs résultats pourraient être obtenus en concevant un modèle complet de dispersion. Il faut pour cela, mesurer les paramètres comme les régimes de vent et de température, les sources parasites de rejet, les vitesses d'émission des gaz et les hauteurs des obstacles autour de la Centrale. L'étude devrait comporter en outre un volet supplémentaire sur la quantification des impacts des rejets sur l'environnement en général et

la santé des populations en particulier. Enfin, des soins particuliers doivent être observés lors du choix de site pour l'implantation d'une Centrale Thermique. Outre la recherche des facilités d'approvisionnement en combustible et la réduction des coûts de distribution de l'électricité, le modèle indique que les régions vallonnées doivent être privilégiées tandis que les centres des grandes agglomérations devraient être écartés.

Remerciements

Les auteurs remercient :

*Monsieur Ahmed Coulibaly, Directeur de la Centrale Thermique Ouaga II,
Monsieur Sibiri J. B. Compaoré, Service Environnement de la Sonabel,
Monsieur Samandougou Sékou, Service Environnement de la Sonabel,
pour leur disponibilité et pour avoir fourni des données techniques
indispensables à l'accomplissement de ce travail.*

Références

- [1] - A. Ouédraogo et A. G. Sodr , *Journal Africain des Sciences de l'Environnement*, 001 (2006) 10-19
- [2] - Code de l'environnement du Burkina Faso, *Journal Officiel Spécial* N 4 du vendredi (25/04/1997)
- [3] - A. Ouédraogo et J. B. Karama, *Actes du Forum national de la Recherche Scientifique et des Innovations Technologiques (FRSIT)*, Tome 2 (2004) 401- 411.
- [4] - The World Bank Group in collaboration with the United Nations Environment and the United Nations Industrial Development Organization, *Pollution Prevention and Abatement Handbook*, *World Bank Publications*, ISBN 0-8213-3638-X, (1998), pp.427-429
- [5] - C. A. Poffal, J. R. S. Zabadal and M. G. Salgueiro, *Proceedings of the 11th Brazilian Congress of Thermal Sciences and Engineering, Braz. Soc. of Mechanical Sciences and Engineering-ABCM*, Curitiba, Brazil, Dec, 5-8, (2006), ISBN 978-85-85769-27-7, paper CIT06-0328.

- [6] - D. Buske, M. T. De Vilhena, D. M. Moreira and T. Tirabassi, Proceedings of the 11th Brazilian Congress of Thermal Sciences and Engineering, *Braz. Soc. of Mechanical Sciences and Engineering- ABCM*, Curitiba, Brazil, Dec, 5-8, (2006), ISBN 978-85-85769-27-7, paper CIT06-0591.
- [7] - M. N. Ozisik, Heat conduction, Second edition, *John Wiley & sons inc*, (1993), pp. 372-389.
- [8] - E. Boeker and R. van Grondelle. *Environmental Physics*, JOHN WILLEY & SONS, (1995), pp. 248-257
- [9] - Arrêté du 25 janvier 1991 relatif aux installations d'incinération de résidus urbains, JO (France) du 8 mars (1991).
- [10] - 8 août 1975 - Arrêté royal relatif à la prévention de la pollution atmosphérique par les oxydes de soufre et les poussières engendrée par les installations industrielles de combustion, M.B. (02.10.1975), Belgique, <http://mrw.wallonie.be/dgrne/legis/air/air006.htm>
- [11] - Petites installations de combustion, Arrêté Ministériel du 25/07/1997- JO (France) du 27 septembre (1997).
- [12] - Ohio EPA, Division of air pollution control, West Town Street, Suite 700 Columbus, OH 43215, USA, http://www.epa.state.oh.us/dapc/regs/3745-16/3745_16.html
- [13] - Kansas Stack height Requirements, Region 7 air program, U.S. Environmental Protection Agency, <http://www.epa.gov/region7/programs/artd/air/rules/kansas/stack.htm>
- [14] - Petites installations de combustion, TOTAL France, RM/SPE/CL/CA,(17/10/2005), <http://www.total.fr/fr/content/NT00009882.pdf>
- [15] - Summary Environmental Impact, AES KELANITISSA Power Plant, 163 MW, (August 2000), <http://www.adb.org>