

Contribution à l'étude du trouble atmosphérique de Linke sur le site de Ghardaïa

Y. Bouhadda et L. Serrir

Unité de Recherche Appliquée en Energies Renouvelables,
B.P. 88, Gare Etaam, 47000 Ghardaïa

(reçu le 20 Décembre 2005 - accepté le 20 Décembre 2006)

Résumé - Dans ce travail, nous allons représenter une étude sur le trouble atmosphérique, en se focalisant sur le facteur de trouble de Linke. Nous avons utilisé deux formulations différentes: Kasten et Ineichen pour déterminer expérimentalement ce facteur. Nous avons mesuré le facteur de Linke durant une année (entre le 01/09/2004 et 01/09/2005) à Ghardaïa en utilisant ces deux formulations. Les résultats seront interprétés en utilisant les observations météorologiques à la fin de ce travail.

Abstract - In this work we are going to represent a study on the atmospheric trouble where we are focusing on the Linke turbidity coefficient. We used two different formulations: Kasten and Ineichen to determine this factor experimentally. We measured the coefficient of Linke lasting one year (brings in the 01/09/2004 and 01/09/2005) in Ghardaïa while using these two formulations. Results will be interpreted using the meteorological observations at the end of this work.

Mots clés: Trouble atmosphérique - Facteur de Linke - Observations météorologiques.

1. INTRODUCTION

Les radiations solaires sont atténuées en traversant l'atmosphère terrestre. Cette extinction de la radiation est principalement due à la diffusion par les aérosols, et à l'absorption par les différents composants atmosphériques, tel que: l'ozone, la vapeur d'eau, l'oxygène, le bioxyde du carbone et d'autres. La quantité des aérosols dans l'atmosphère peut être représenté par les coefficients de trouble. Plusieurs coefficients ont été introduits (comme par exemple: facteur de trouble d'Ångström, de Linke et d'Unsworth-Monteilh) pour étudier le trouble atmosphérique. Dans ce travail, nous allons se localiser sur le facteur de Linke et déterminer expérimentalement ce facteur dans le site de Ghardaïa.

2. DEFINITION

On peut définir le facteur de Linke comme étant le nombre d'atmosphères idéales qui, si elles étaient superposées, entraîneraient la même atténuation que l'atmosphère réelle.

$$T_L = \frac{\delta_m}{\delta_i} = \log(T_m) / \log(T_i) \quad (1)$$

δ_m : Epaisseur optique moyenne sur l'ensemble du spectre pour une atmosphère réelle.

δ_i : Epaisseur optique moyenne sur l'ensemble du spectre une atmosphère idéale.

T_m et T_i : Facteurs de transmission pour une atmosphère réelle et idéale respectivement, que l'on peut calculer à l'aide des formules données lors de la description des modèles analytiques [1].

D'après la définition, T_L doit être en fonction de la masse d'eau condensable, de la quantité et la qualité des aérosols et de la masse atmosphérique m , donc de la hauteur angulaire, et de l'altitude z de la station. Nous citons brièvement quelques relations empiriques, déduites par la mesure de T_L et sa corrélation avec d'autres paramètres météorologiques:

Perrin de Brichambaut et Vauge [2] donnent:

$$T_L = 2,5 + 16 \beta + 0,5 \log w \quad (2)$$

w : Masse d'eau condensable.

β : Coefficient de trouble d'Ångström.

Certains auteurs essaient de remplacer β par la visibilité v exprimée en km. Hamlen [3] propose une formule établie en Canada:

$$T_L = 1 + 0,5 e^{0,43} + 9,35 / v \quad (3)$$

où e : Tension de vapeur en mb ou hPa.

C. Oueymard [4] compare les divers indices de turbidité et il propose:

$$T_L = 1 + (m \cdot w)^{0,26} + (1/v) (2 + m^{0,85}) \quad (4)$$

L'O.M.M décompose T_L en cinq termes:

$$T_L = 3,3 + DT_1 + DT_2 + DT_3 + DT_4 \quad (5)$$

$DT_1 = 0,35z$; $DT_2 = 0,5 \log w - 0,214$; $DT_3 = -0,9 + 15 \beta$; DT_4 : un terme correctif .

Il faut remarquer que les relations sont empiriques. Pour des conditions identiques, elles ne donnent pas toutes la même valeur de T_L .

3. DETERMINATION EXPERIMENTALE

3.1 Modèle de Kasten (1996)

Le modèle d'estimation le plus récent est celui présenté par Kasten [5]. Il exprime le trouble de linke T_L à partir de l'irradiation directe reçue sur plan normal par journée de ciel clair de la façon suivante:

$$T_L = \frac{1}{\delta_R m} \log \left(\frac{I_0}{I_n} \right) \quad (6)$$

$$\delta_R = \left(6,6293 + 1,7513 m - 0,1202 m^2 + 0,0065 m^3 - 0,00013 m^4 \right)^{-1} \quad (7)$$

I_n : Irradiation solaire directe d'incidence normale

I_0 : Constante solaire

m : Masse d'air.

3.2 Formule d'Ineichen et Perez (2002)

Ineichen et Perez [6] ont proposé une nouvelle formule pour le facteur de trouble, sur laquelle ils ont basé sur les travaux aboutis par d'autres auteurs sur le facteur de Linke. Nous résumons leur travail.

En tenant compte de principe de raisonnement de Linke, le facteur de trouble T_L peut être défini par cette relation:

$$I_n = I_0 \exp(-\delta_{cda} \cdot T_L \cdot m) \quad (8)$$

δ_{cda} : défini par Linke [7] comme l'épaisseur optique d'une atmosphère sans nuages, vapeur d'eau et aérosols, il a utilisé la formule suivante:

$$\delta_{cda} = 0,128 - 0,054 \log(m) \quad (9)$$

Feussner et Dubois [8] ont publié une série des données spectrales capable de calculer δ_{cda} , où la diffusion moléculaire et l'absorption de la couche d'ozone stratosphérique sont prises en compte. Kasten [9] a ajusté l'équation suivante en utilisant ses données:

$$\delta_{cda} = (9,4 + 0,9 m)^{-1} \quad (10)$$

connue sous la formule pyréliométrique de Kasten.

Dans cette formule qui a été largement utilisée, l'absorption par les gaz atmosphériques permanents tels que: CO₂, O₂, NO₂ et CO est prise en compte.

L'effet de ces gaz inclut dans la formule de T_L , contribue incorrectement au trouble atmosphérique comme il a été noté par Katz [10] et confirmé par Kasten [5].

En essayant de prouver la formule, Louche [11] et Grenier [12] ajoutèrent l'absorption par les constituants permanents de l'atmosphère. Basé sur le calcul des rayonnements spectraux, Louche [11] a ajusté un polynôme de 4^{ème} ordre de la masse d'air et Grenier [12] a ajouté des changements à l'absorption spectrale et à l'équation de la diffusion:

$$\delta_{cda} = (6,55567 + 1,7513 m - 0,1202 m^2 + 0,0065 m^3 - 0,00013 m^4)^{-1} \quad (11)$$

Les valeurs de δ_{cda} sont plus élevées (ce qui veut dire que les valeurs de T_L sont petites) que celles obtenues par la formule de Kasten [9], soit plus de 25 % pour des petites valeurs de la masse d'air.

Molineaux [13] note que les formules de Louche [11] et de Grenier [14] divergent respectivement pour une masse d'air de plus de 20. Il a adapté pour le coefficient de Linke cette formule:

$$\delta_{cda} = 0,124 - 0,0656 \log(m) \quad (12)$$

L'approche d'Ineichen *et al.* [6] pour la détermination de la masse d'air est différente. Ils ont basé leur définition sur le facteur de trouble de Linke corrigé par Kasten T_{LK} à une masse d'air égale à 2 et sera prise comme référence.

Pour les irradiations globales et directes, ils ont développé deux modèles empiriques qui peuvent reproduire les formes des mesures des irradiations globales pour une base des données de 7 sites différents. Ces modèles tiennent en compte le trouble atmosphérique et l'altitude de lieu.

Ils ont après utilisé le rayonnement direct par ciel clair pour extraire le facteur de trouble de Linke et l'épaisseur optique δ_{cda} .

Cette approche est basée sur des considérations expérimentales, tandis que les autres approches citées ci-dessus sont basées sur des considérations théoriques. L'irradiation directe est donnée par:

$$I_n = b I_0 \exp(-0,09 m \cdot (T_L - 1)) \quad (13)$$

où le coefficient b est une fonction de l'altitude (f_{h1} est donné par Kasten [15]).

$$b = 0,664 + 0,163 / f_{h1} \quad (14)$$

$$f_{h1} = \exp(-\text{altitude} / 8000) \quad (15)$$

$$T_L = \left[11,1 \times \log\left(\frac{b I_0}{I_n}\right) / m \right] + 1 \quad (16)$$

3.3 Masse d'air

La dépendance de facteur de Linke T_L en masse d'air est une conséquence de la forte dépendance de la diffusion Rayleigh en longueur d'onde.

3.3.1 Définition

La définition la plus simple de la masse d'air est le parcours relatif d'un rayon de lumière solaire à travers l'atmosphère.

Considérant ρ la masse volumique et l la longueur du trajet optique, la masse atmosphérique (ou masse optique) en kg.m^{-2} .

$$m' = \int_0^{\infty} \rho \cdot dl \quad (17)$$

ρ et l sont fonctions de l'altitude z .

La masse atmosphérique unité, est la masse atmosphérique pour la direction du zénith, la 'masse atmosphérique unité' en kg.m^{-2} :

$$m_1' = \int_0^{\infty} \rho \cdot dz \quad (18)$$

La masse atmosphérique relative m :

$$m = \frac{m'}{m_1'} = \frac{\int_0^{\infty} \rho \cdot dl}{\int_0^{\infty} \rho \cdot dz} \quad (19)$$

Pour résoudre l'équation (19), la variation de la densité de l'air doit être connue. En tenant compte de la courbure de la Terre, et la réfraction de l'atmosphère (Fig. 1), Kasten [16] a trouvé une formule dérivée de l'équation (19):

$$m = \frac{1}{\rho_0 z_0} \int_0^{+\infty} \left[1 - \left(\frac{r_e}{r_e + z_0} \right)^2 \left(\frac{n_0}{n} \right)^2 \sin^2 h' \right]^{-\frac{1}{2}} \rho dz \quad (20)$$

avec:

h' : Hauteur apparente

ρ : Masse volumique, $\rho = \rho(z)$ et $\rho_0 = \rho(0)$

n : Indice de réfraction, $n = n(z)$ et $n_0 = n(0)$

z_0 : Hauteur de l'atmosphère homogène

r_e : Rayon de la terre.

Une solution de cette équation a été faite par Kasten où il a utilisé la densité de modèle atmosphérique 1959 ARDC et l'indice de réfraction pour une longueur d'onde de $0,7 \mu\text{m}$.

$$m = \frac{1}{\left[\sin(h) + 0,15(3,885 + h)^{-1,253} \right]} \quad (21)$$

Dans l'atlas solaire, Capderou [17] a utilisé la formule suivante:

$$m = \frac{1}{\sin(h) + 9,40 \cdot 10^{-4} (\sin(h) + 0,0678)^{-1,253}} \quad (22)$$

Toutefois, un meilleur calcul a été donné par Kasten et Young [18] et qui a été largement utilisé (Ineichen [6], Smarts2 [19]).

$$m = \frac{1 - z/10000}{\sin(h) + 0,50572 (h + 6,07995)^{-1,6364}} \quad (23)$$

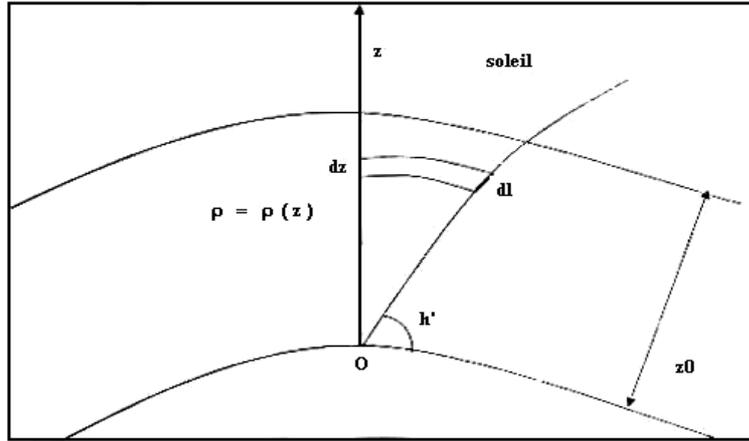


Fig. 1: Masse atmosphérique pour le cas général

Le cas le plus simple est:

$$m = \frac{1}{\sin(h)} \quad (24)$$

La figure 2 représente les allures de ces formules.

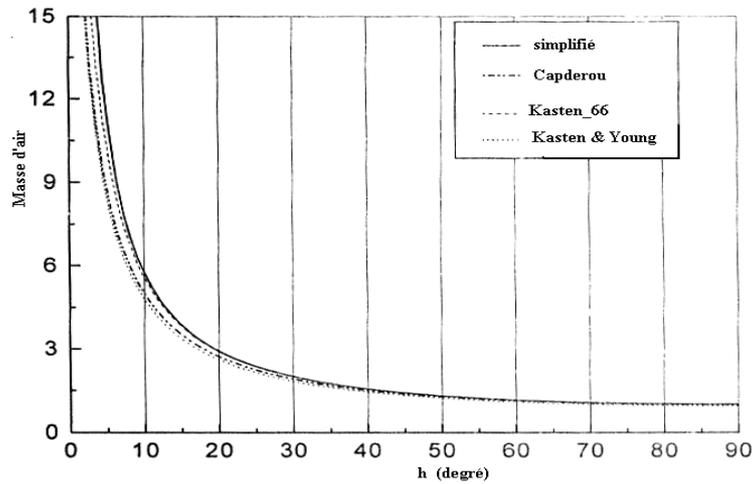


Fig. 2: Masse atmosphérique relative en fonction de la hauteur du soleil en utilisant les formules (20 à 23)

Nous remarquons que les quatre équations sont confondues pour des hauteurs supérieures à 25°, et le décalage est apparu grand pour des petites hauteurs solaires inférieures à 10°.

En conclusion, la masse d'air est égale à $1/\sin(h)$ en première approximation, pour des hauteurs supérieures à 15° [20]. Par contre, pour les grandes valeurs de θ_s , on ajoute un terme correctif tenant compte de la sphéricité de la Terre [18].

4. RESULTATS ET DISCUSSION

Nous avons utilisé les données expérimentales mesurées à l'Unité de Recherche Appliquée sur les Energies Renouvelables (U.R.A.E.R.), Ghardaïa.

Nous avons calculé la masse d'air en utilisant la formule de Kasten et Young [18], où la hauteur du soleil h est déduite à partir de la formule suivante:

$$\sin(h) = \frac{G_{\text{hor}} - D_{\text{hor}}}{I_{\text{nor}}} \quad (25)$$

Puis le facteur de Linke a été estimé en utilisant les deux modèles:

- a- le modèle de Kasten [5] (relations (6) et (7)).
- b- le modèle de Ineichen [6] (relations (14), (15) et (16)).

Dans la figure 3, nous avons représenté le facteur de Linke selon les deux approches (Kasten 96 et Ineichen 02) et cela pour plusieurs journées de l'année.

Nous remarquons:

1- une stabilité apparente de facteur de linke durant toute la journée caractérisant ainsi le facteur de Linke, sauf au moment de coucher et de lever de soleil où le phénomène de réfraction influe sur l'estimation de ce facteur. Cette stabilité durant la journée a été aussi observée avant par Ineichen *et al.* [6];

2- quand les valeurs de facteur de Linke sont petites (mars), l'erreur entre les deux formules (Kasten et Ineichen) est négligeable, tandis que pour les grandes valeurs (août) l'écart entre les deux modèles est flagrant.

Nous avons aussi estimé le facteur de Linke mensuel mesuré entre les dates 01/09/2004 et 01/09/2005. Les variations des valeurs mensuelles de T_L sont représentées sur la figure 4.

Ces dernières présentent, au cours d'une année entière, un maximum en été (Juin, Juillet et Août) et un minimum en hiver (Février et Mars), ce qui est en parfait accord avec d'autres travaux publiés [21], et cela peut être expliqué par une saison d'été (d'Avril à Septembre) caractérisée par un climat très chaud et des vents de secteurs Sud (sirocco) qui favorisent le transport des particules et des poussières (vent de sable) donc T_L important. La saison d'hiver, d'Octobre à Mars, est marquée par des pluies qui lessivent le ciel et contribuent à la diminution de T_L [21].

5. CONCLUSION

Nous avons étudié le trouble atmosphérique de Linke, en utilisant deux formulations, Kasten (1996) [5] et Ineichen (2002) [6], où l'accord était appréciable entre les deux modèles. Aussi, nous avons étudié la masse d'air atmosphérique dont la connaissance de ce paramètre peut contribuer à l'étude globale du rayonnement solaire.

La comparaison de plusieurs formules proposées par la littérature nous a permis de déduire la convergence entre ces formules, et nous avons choisi la formule de Kasten et Young [18] qui est la plus récente et la plus utilisée, pour l'injecter dans l'étude de trouble atmosphériques.

Nous avons mesuré le facteur de trouble de Linke durant une année (entre le 01/09/2004 et 01/09/2005) à Ghardaïa et nous avons caractérisé la région par une saison dont les valeurs de ce facteur est faible (hiver) et une saison à des valeurs de facteur de Linke élevées (été). Cela peut être expliqué par les conditions météorologiques accompagnant chaque saison.

Enfin, l'étude sera améliorée en utilisant une base de donnée plus étendue en espace (d'autres sites voisins) en temps (au moins 4 ans) pour proposer un modèle en se basant sur le facteur de Linke mesuré.

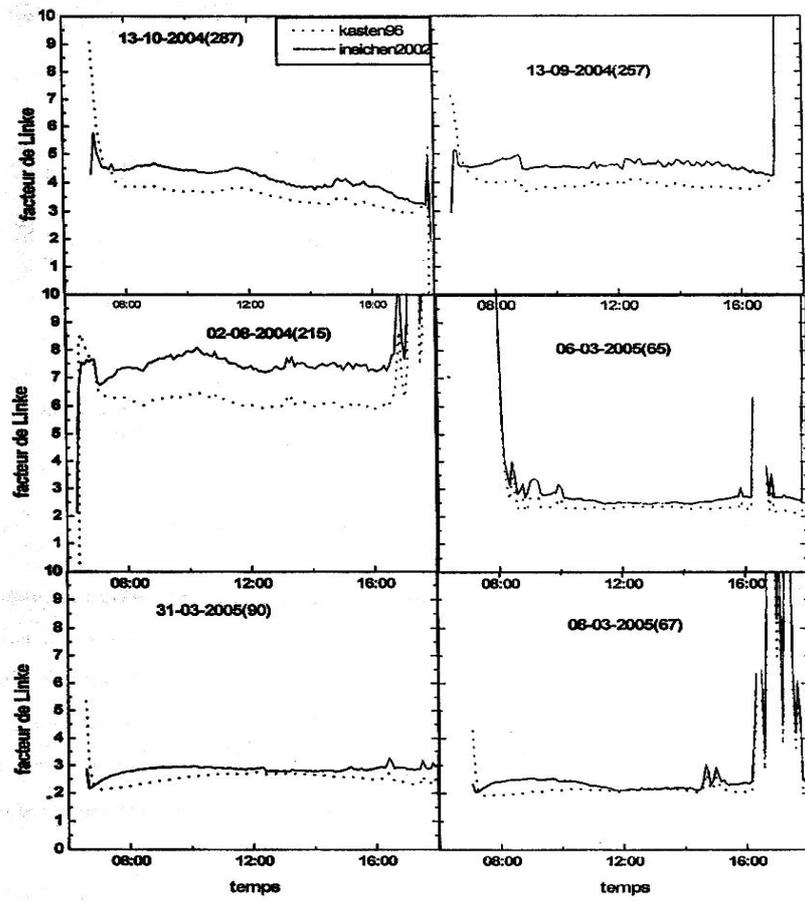


Fig. 3: Estimation du facteur de Linke, selon deux approches (Kasten96 et Ineichen2002)

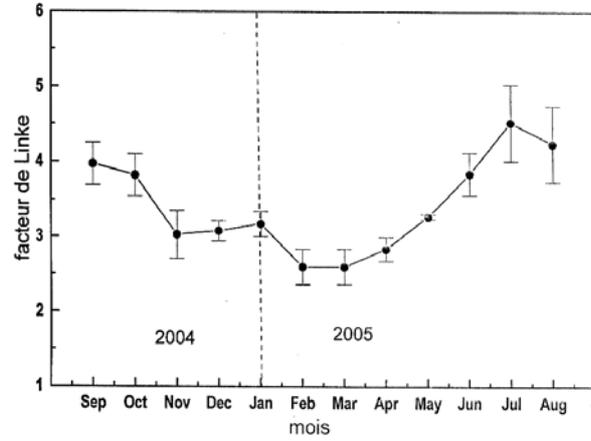


Fig. 4: Variations mensuelles de T_L à Ghardaïa

REFERENCES

- [1] C. Delorme, 'Systèmes Energétiques Solaires', Tome 1 : Gisement Solaire, 1987.
- [2] C. Perrin de Brichambaut et C. Vauge, 'Le Gisement Solaire', Ed. Tech. & Doc., Paris, 1982.
- [3] S.S. Hamlen and W.A. Hamlen, Solar Energy, Vol. 19, pp. 217 - 218
- [4] C. Gueymard, Proceedings Conf. SESCO, Montréal, pp. 365 - 368, 1981.
- [5] F. Kasten, 'The Linke Turbidity Factor Based on Improved Values of the Integral Rayleigh Optical Thickness', Solar Energy, Vol. 60, pp. 17 - 24, 1997.
- [6] P. Ineichen and R. Perez, 'A New Airmass Independent formulation for the Linke Turbidity Coefficient', Solar Energy, Vol. 73, N°3, pp. 151 - 157, 2002.
- [7] F. Linke, 'Transmissions-Koeffizient und Trübungsfaktor', Beilr. Phys. Fr. Atmos., Vol. 10, pp. 91 - 103, 1922.
- [8] K. Feussner and P. Dubois, 'Trübungsfaktor, Precipitable Water', Staub. Gerlands Beitr., Geophys., Vol. 27, pp. 132 - 175, 1930.
- [9] F. Kasten, 'A Simple Parameterization of Two Pyrheliometric formulae for determining the Linke Turbidity Factor', Meteorol. Rdsch 33, pp. 124 - 127, 1980.
- [10] M. Katz, A. Baille and M. Mermier, 'Atmospheric Turbidity in a Semi-Rural Site, Evaluation and Comparison of Different Turbidity Coefficients', Solar Energy, Vol. 28, pp. 323 - 327, 1982.
- [11] A. Louche, G. Péri and M. Iqbal, 'An Analysis of Linke Turbidity Factor', Solar Energy, Vol. 37, pp. 393 - 396, 1986.
- [12] J.C. Grenier, A. de la Casinière and T. Cabot, 'A Spectral Model of Linke's Turbidity Factor and its Experimental Implications', Solar Energy, Vol. 52, pp. 303 - 314, 1994.
- [13] B. Molineaux, P. Ineichen and J.J. Delaunay, 'Direct Luminous Efficacy and Atmospheric Turbidity Improving Model Performance', Solar Energy, Vol. 55, N°2, pp. 125 - 137, 1995. [14] J.C. Grenier, A. de la Casinière and T. Cabot, 'Atmospheric Turbidity Analyzed by Means of Standardized Linke's Turbidity Factor', J. Appl. Meteo, Vol 34, pp. 1449 - 1458, 1995.
- [15] F. Kasten, 'Parametrisierung der Globalstrahlung durch Bedeckungsgrad und Trübungs Faktor', Annalen der Meteorologie Neue Folge, Vol. 20, pp. 49 - 50, 1984.
- [16] F. Kasten, 'A New Table and Approximation Formula for Relative Optical Air Mass', Arch. meteorol. Geophys, Bioklimatol, Ser. B14, pp. 206 - 223, 1966.
- [17] M. Capderou, 'Atlas Solaire Algérien', Tome 1, Vol 1 et 2 : Modèles Théoriques et Expérimentaux', Office des Publications Universitaires, Algérie, 1987.
- [18] F. Kasten and A.T. Young, 'Revised Optical Air Mass Tables and Approximation Formula', Applied Optics, Vol. 28, N°22, pp. 4735 - 4738, 1989.
- [19] C. Gueymard, 'Smarts2, A Simple Model of the Atmospheric Radiative Transfer of Sunshine', Florida Solar Energy Center, FSEC-PF-270-95, 1995.
- [20] P. Ovidiu, 'Télé-détection de l'Aérosol Désertique depuis le Sol par Radiométrie Infrarouge Thermique Multibande', Thèse de Doctorat d'Etat, N°3334, Université des Sciences et Technologies de Lille, 2003.