

15 décembre 1999

CERN LIBRARIES, GENEVA



SCAN-0006085

IPNO-DR-99-35

***Pouvoirs d'arrêt des gaz pour les ions
de tellure à 40 MeV/nucléon***

*R. Bimbot, A. Khoumri, A. Fahli, S. Barbey, T. Benfoughal,
M. Mirea, A. Hachem, G. Fares, R. Anne, H. Delagrangé,
C. Tribouillard, Y. Georget, J.C. Foy*

Pouvoirs d'arrêt des gaz pour les ions de tellure à 40 MeV/nucléon

**R. Bimbot ^a, A. Khoumri ^b, A. Fahli ^b, S. Barbey ^a, T. Benfoughal ^a,
M. Mirea ^a, A. Hachem ^c, G. Fares ^c, R. Anne ^d, H. Delagrange ^d,
C. Tribouillard ^d, Y. Georget ^d, J.C. Foy ^d**

^a*Institut de Physique Nucléaire, CNRS - IN2P3, 91406 Orsay Cedex, France*

^b*Fac. Sciences Ben M'Sik, L.P.I.R.I., Av. Driss El Harti B.P.7955 Casablanca, Maroc*

^c*Université de Nice, Laboratoire de Radiochimie, 06034 Nice Cedex, France*

^d*GANIL, B.P. 5027, 14076 Caen Cedex 5, France*

abstract

The stopping powers of six gaseous media have been measured for incident 40 MeV/u ¹²⁵Te heavy ions. The experimental procedure consists of measuring with precision the energy loss of the ions crossing a given thickness of gas confined in a cell. The beam energy measurements before and after slowing down were performed using the LISE magnetic spectrometer at GANIL. The gas stopping power thus determined are lower by about 10% than tabulated values corresponding to solid media. This means that the gas-solid effect is still significant at 40 MeV/u for Te ions. The projectile effective charge derived from these measurements depends on the target atomic number following the trend observed in previous experiments concerning lighter ions or lower energies.

Résumé

Les pouvoirs d'arrêt de six gaz simples et composés ont été déterminés pour des ions incidents ^{125}Te de 40 MeV/u. La procédure expérimentale consiste à mesurer avec précision la perte d'énergie des ions traversant une épaisseur donnée du gaz confiné dans une cellule. Les mesures des énergies du faisceau avant et après ralentissement sont effectuées en utilisant le spectromètre magnétique LISE au GANIL. Les pouvoirs d'arrêt des gaz ainsi déterminés sont inférieurs d'environ 10% aux valeurs tabulées correspondant à des ralentisseurs solides. Cela signifie que l'effet gaz-solide est toujours significatif pour les ions de tellure à 40 MeV/u. La charge effective du projectile déduite de ces mesures montre une dépendance en fonction du numéro atomique de la cible similaire à celle observée dans des expériences précédentes concernant des ions plus légers ou de plus faibles énergies.

1. Introduction

Le ralentissement des ions lourds dans la matière a fait l'objet d'études depuis de nombreuses années. Ces études ont conduit en particulier à la réalisation de tables semi-empiriques de pouvoirs d'arrêt. Parmi celles-ci, l'une des plus précises concerne le ralentissement des ions lourds de 2.5 à 500 MeV/u dans les milieux solides [1]. Le calcul de ces pouvoirs d'arrêt repose sur ceux de particules légères (protons ou particules alpha) et sur une paramétrisation de la charge effective Q_{eff} de l'ion incident. Dans la référence [1], cette paramétrisation est déduite d'un ensemble de valeurs expérimentales de pouvoirs d'arrêt des solides pour les ions lourds couvrant une gamme d'énergie de 3 à 80 MeV/u [2].

Les milieux gazeux présentent une différence de pouvoir d'arrêt avec les solides. Cet "effet gaz-solide" a été découvert en 1982 à Darmstadt [3] et confirmé par les travaux ultérieurs menés à Orsay [4-6]. La charge effective des ions traversant les gaz diffère donc de celle qui correspond aux ralentisseurs solides, et sa paramétrisation doit s'appuyer sur des valeurs expérimentales de pouvoirs d'arrêt obtenues en milieux gazeux. De telles données expérimentales sont relativement complètes pour les projectiles légers de 3 à 100 MeV/u, mais plus fragmentaires pour les ions plus lourds que l'argon. Dans le but de combler ce vide, des expériences ont été réalisées récemment avec des faisceaux de plomb et d'uranium de 25 à 30 MeV/u [7]. Le présent travail concerne des projectiles de tellure ($Z = 52$) à 40 MeV/u, et prolongera les mesures expérimentales faites avec des ions d'argent ($Z = 47$) à basse énergie [5] et de xénon ($Z = 54$) jusqu'à 25 MeV/u [6].

2. Technique expérimentale

Le faisceau de ^{125}Te est délivré par l'accélérateur GANIL à une énergie de 40 MeV/u. Les pouvoirs d'arrêt sont mesurés dans des gaz simples et composés (H_2 , He, N_2 , Ne, Kr et CH_4) dont l'indice de pureté est meilleur que 99.99%.

Les techniques expérimentales sont décrites en détail dans les références [6-8]. Le principe de la méthode est basé sur la mesure précise de la perte d'énergie ΔE des ions Te dans une cible gazeuse d'épaisseur x donnée. Le gaz est contenu dans une cellule munie de deux fenêtres de nickel, qui est décrite dans la référence [8]. Le pouvoir d'arrêt S peut être facilement calculé à l'aide de l'approximation suivante :

$$S(E_M) = -\frac{dE}{dx} \cong \frac{\Delta E}{x} \quad (1)$$

avec

$$\Delta E = (E_1 - \Delta E_1) - (E_F + \Delta E_2) \quad (2)$$

où E_1 et E_F désignent l'énergie initiale et l'énergie finale du faisceau, ΔE_1 et ΔE_2 les pertes d'énergie dans la première et la seconde fenêtre de la cellule.

La pression du gaz utilisé comme dégradeur est choisie de telle sorte que les pertes d'énergie soient comprises entre 5 et 20% de l'énergie incidente. L'approximation (1) est alors pleinement valable et le pouvoir d'arrêt ainsi déterminé correspond à l'énergie moyenne E_M du projectile dans le ralentisseur :

$$E_M = \frac{(E_1 - \Delta E_1) + (E_F + \Delta E_2)}{2} \quad (3)$$

La détermination précise des énergies du faisceau incident et dégradé est effectuée à l'aide du spectromètre magnétique LISE, à partir des valeurs mesurées des rigidités magnétiques du faisceau $B_1\rho$ et $B_F\rho$. Ces rigidités magnétiques sont liées aux énergies par l'équation relativiste [7] :

$$B\rho = k \frac{A}{Q} \left[\varepsilon \left(1 + \frac{\varepsilon}{2m_v} \right) \right]^{1/2} \quad (4)$$

où

B (Tesla) le champ magnétique dans le dipôle du spectromètre.

ρ (m) le rayon de courbure de la trajectoire centrale dans le dipôle.

Q la charge ionique détectée.

$\varepsilon = E/A$ l'énergie par nucléon du faisceau.

$m_u = 931.5$ MeV/u l'énergie équivalente à 1 u.m.a.

$k = (2m_u/c)^{1/2} = 0.1438$.

La rigidité magnétique est mesurée avec une incertitude relative de 10^{-4} en utilisant les éléments de diagnostic du faisceau du spectromètre. L'avantage de cette mesure est de minimiser l'incertitude sur la perte d'énergie ($E_I - E_F$) des ions.

La détermination exacte des pertes d'énergie dans les deux fenêtres de nickel ne peut être directement obtenue par simple mesure de leurs valeurs à pression de gaz nulle (cellule à gaz vide). En effet, en présence du gaz dans la cellule, deux phénomènes se manifestent :

- les fenêtres de nickel se déforment sous l'influence de la pression du gaz et par conséquence leurs épaisseurs se modifient.
- en présence de gaz, le ralentissement des ions dans la fenêtre de sortie s'effectue à une énergie plus faible qu'en l'absence de gaz.

Pour pallier cette difficulté, les pertes d'énergie ΔE_1 et ΔE_2 dans les deux fenêtres sont déterminées à partir des pouvoirs d'arrêt du nickel tabulés de la référence [1] en utilisant des épaisseurs corrigées par la méthode de Spivack [8].

Une mesure précise de la température et la pression du gaz utilisé comme ralentisseur permet au moyen la formule de Van der Waals [6] de calculer la quantité de matière (en mg/cm^2) située entre les deux fenêtres de la cellule et donc traversée par les ions.

3. Résultats

Les résultats expérimentaux concernant le ralentissement des ions Te à 40 MeV/u dans les six gaz sont présentés dans le tableau (1). Pour chaque gaz, deux ou trois épaisseurs différentes du ralentisseur (c'est-à-dire deux ou trois pressions différentes du gaz) sont choisies pour la mesure des pouvoirs d'arrêt. Si l'on tient compte des incertitudes expérimentales et de la variation du pouvoir d'arrêt S avec l'énergie du projectile, les résultats obtenus pour différentes épaisseurs d'un même gaz sont compatibles entre eux. Ceci permet de conclure que l'équilibre d'état de charge du projectile est atteint ou proche de l'être à la sortie de la première fenêtre de nickel.

Pour un gaz ralentisseur donné, les pouvoirs d'arrêt déterminés à partir d'épaisseurs de matière différentes correspondent à des énergies moyennes légèrement différentes. Comme on peut le voir dans le tableau 1, les énergies moyennes par nucléon couvertes par ces mesures s'étendent de 35.4 à 38.5 MeV/u. Par interpolation entre les valeurs ainsi mesurées, les pouvoirs d'arrêt des six gaz ont été déterminés à l'énergie de 37.5 MeV/u, et ces valeurs sont comparées entre elles dans la figure 1, où elles sont reportées en fonction du numéro atomique Z_2 de la cible. Afin de mettre en évidence l'effet gaz-solide, ces valeurs sont également comparées, sur la même figure, aux pouvoirs d'arrêt de milieux solides correspondant au même projectile à la même énergie. Ces dernières valeurs sont issues des tabulations de Hubert et al [1]. L'écart observé, en faveur des milieux solides, varie en fonction de Z_2 autour d'une valeur moyenne égale à environ 10%.

Ces données sont également comparées avec les valeurs $S_{T.E.}$ obtenues en supposant un épluchage total des ions dans le ralentisseur. Celles-ci sont calculées à partir d'une loi d'échelle en Z_1^2 relative aux pouvoirs d'arrêt d'ions He^{2+} , notés S_α , en utilisant la relation suivante :

$$S_{T.E.} = \frac{Z_1^2}{4} S_\alpha \quad (5)$$

La relation (5) est elle-même obtenue à partir de la paramétrisation classique, plus générale :

$$S_{L,v,Z_2} = \frac{Q_{eff}^2}{Q_\alpha^2} S_{\alpha,v,Z_2} \quad (6)$$

qui relie les pouvoirs d'arrêt d'un milieu donné (Z_2), pour des ions lourds (S_{L,v,Z_2}) et des ions d'hélium (S_{α,v,Z_2}) à la même vitesse incidente (v) c'est-à-dire à la même énergie par nucléon. Les paramètres Q_{eff} et Q_α sont les charges effectives respectives de l'ion lourd et de l'ion hélium. Pour les ions totalement épluchés, l'état de charge de l'ion est égal à son numéro atomique, ce qui conduit à $Q_{eff} = Z_1$ et $Q_\alpha = 2$. Les pouvoirs d'arrêt de l'hélium sont obtenus à partir de la référence [9].

Il est clair, sur la figure 1, que les ions de tellure ne sont pas totalement épluchés. La valeur moyenne du paramètre $\gamma = Q_{eff} / Z_1$, qui caractérise leur degré d'épluchage est de 0,91 pour les milieux solides, comme le montre la ligne en pointillé, calculée par la relation (6) avec cette valeur de γ . En ce qui concerne les milieux gazeux, la valeur de γ est plus faible. Ce point sera discuté plus loin.

L'affaiblissement de l'effet gaz-solide à mesure que l'état de charge de l'ion s'approche de l'épluchage total peut être apprécié en comparant la figure 1 avec les représentations

équivalentes obtenues à 40 MeV/u [6] pour les ions d'argon et de krypton (figures 2.a et 2.b). Cette évolution est tout à fait semblable à celle observée aux environs de 25 MeV/u pour des ions allant de l'oxygène à l'uranium, comme on peut le voir sur les figures 3 et 4.a et 4.b issues des références [6] et [7]. L'ensemble de ces résultats confirment la disparition de l'effet gaz-solide lorsque l'ion incident tend à être complètement épluché.

4. Charge effective des ions dans les gaz

Les valeurs du paramètre de charge effective γ relatives aux ions Te et à différents gaz ralentisseurs de numéro atomique Z_2 ont été calculées à partir des pouvoirs d'arrêt à 37.5 MeV/u issus de ce travail en utilisant la relation (6) et les pouvoirs d'arrêt des gaz correspondants pour l'hélium [9]. Elles sont représentées dans la figure 5 en fonction de Z_2 . Afin de visualiser l'effet gaz-solide en terme de charge effective, des valeurs relatives aux milieux solides, déduites de la référence [2] sont présentées sur la même figure. Il apparaît clairement que les charges effectives des ions-projectiles sont plus élevées dans les solides que dans les gaz. Rappelons que cet effet est interprété par une différence de charge ionique des projectiles dans les deux types de matériaux, différence attribuée elle-même à un effet de densité [10]. La valeur moyenne du paramètre γ pour l'ensemble des gaz explorés ici est d'environ 0,87.

Enfin, dans la figure 6, l'évolution $\gamma = f(Z_2)$ pour les ions de Te est comparée avec les courbes similaires obtenues à partir des résultats de la référence [6] pour des ions d'argon et de krypton à une énergie proche (40 MeV/u) ainsi que pour le xénon à 25 MeV/u. Cette figure permet d'apprécier le comportement du paramètre γ en fonction de Z_1 , de Z_2 et de l'énergie. Celui-ci se caractérise par les trois points suivants :

- Pour un ion donné et une énergie donnée, la charge effective diminue lorsque Z_2 augmente de 1 (hydrogène) à 54 (xénon). Cette diminution est d'autant plus forte que γ est plus faible.
- A énergie donnée (40 MeV/u), la charge effective moyenne diminue quand la masse du projectile augmente. Cette diminution est de l'ordre de 5% lorsqu'on passe de l'argon au krypton et de 7 à 8% du krypton au tellure.
- Pour un même projectile, ou pour des projectiles voisins, la charge effective augmente avec l'énergie incidente. La charge effective du tellure dans le krypton ($Z_2 = 36$), à 37.5 MeV/u est supérieure de 7 à 8% à celle du xénon à 25 MeV/u dans le même gaz, ce qui paraît normal, mais cet écart diminue quand Z_2 diminue pour s'annuler au niveau de l'hydrogène.

Remarquons cependant que, compte tenu des incertitudes expérimentales, de l'ordre de $\pm 3\%$ sur les valeurs de γ , les valeurs identiques observées ne sont pas incompatibles avec l'écart d'environ 5% attendu à ce niveau.

En conclusion, les résultats obtenus dans ce travail ont permis d'étendre jusqu'à la région de $Z_1 = 50$ et jusqu'à 40 MeV/u la connaissance des pouvoirs d'arrêt des ions lourds dans les gaz. Ils confirment l'existence d'un effet gaz-solide d'amplitude significative, ici 10% environ, qui s'affaiblit quand l'ion incident est de plus en plus épluché. Ils permettent d'avancer dans la connaissance quantitative du paramètre de charge effective γ , nécessaire pour la réalisation d'une tabulation précise des pouvoirs d'arrêt de milieux gazeux. Enfin, ils apportent de nouvelles informations sur l'influence des principaux facteurs concernés dans le ralentissement des ions lourds (énergie de l'ion incident, nature du milieu ralentisseur), ce qui permettra d'en tirer profit pour une meilleure compréhension des mécanismes mis en jeu.

Références

- [1] F. Hubert, R. Bimbot, and H. Gauvin, *At. Data Nucl. Data Tables* **46** (1990) 1.
- [2] F. Hubert, R. Bimbot, and H. Gauvin, *Nucl. Instr. and Meth.* **B36** (1989) 357.
- [3] H. Geissel, Y. Laichter, W. F. W. Schneider and P. Armbruster, *Nucl. Inst. and Meth.* **194** (1982) 21
- [4] R. Bimbot, C. Cabot, D. Gardès, H. Gauvin, R. Hingmann, I. Orliange, L. de Reilhac and F. Hubert, *Nucl. Instr. and Meth.* **B 44** (1989) 1.
- [5] R. Bimbot, C. Cabot, D. Gardès, H. Gauvin, I. Orliange, L. de Reilhac, K. Subotic and F. Hubert, *Nucl. Instr. and Meth.* **B 44** (1989) 19.
- [6] J. Héroult, R. Bimbot, H. Gauvin, B. Kubica, R. Anne, G. Bastin and F. Hubert, *Nucl. Instr. and Meth.* **B 61** (1991) 156.
- [7] R. Bimbot, S. Barbey, T. Benfoughal, F. Clapier, M. Mírea, N. Pauwels, S. Pierre, M.F. Rivet, G. Fares, A. Hachem, R. Anne, Y. Georget, R. Hue and C. Tribouillard, *Nucl. Instr. and Meth.* **B107** (1996) 9.
- [8] J. Héroult, Thèse Toulouse (1988).
- [9] J.F. Ziegler, J.P. Biersack, *The Stopping and Range of Ions in Matter (Program SRIM 1996)*.
- [10] H.D. Betz, *Rev. Mod. Phys.* **44** (1972) 465.

<i>Gaz</i>	<i>x</i> (mg/cm ²)	ΔE (MeV)	<i>E/A</i> (MeV/u)	<i>S</i> (MeV/mg.cm ⁻²)	$\Delta S/S$ (%)
H₂	2,46	1,38	38,32	70	6
	3,27	1,83	38,10	70	5
	4,80	2,73	37,66	71	5
He	3,95	1,01	38,50	32,0	6
	6,54	1,69	38,17	32,3	5
	9,46	2,50	37,79	33,0	5
N₂	19,4	4,49	36,77	28,9	5
	30,3	7,23	35,40	29,9	5
Ne	8,90	1,80	38,06	25,3	6
	17,6	3,64	37,17	25,9	5
	27,3	5,81	36,10	26,6	5
Kr	25,9	3,70	37,51	17,8	5
	51,7	7,42	35,65	18,0	5
CH₄	5,63	1,74	38,10	39	11
	10,8	3,38	37,28	39,2	7
	21,9	7,19	35,39	41,0	5

Tableau 1. Pouvoirs d'arrêt expérimentaux des gaz mesurés pour les ions Te à 40 MeV/u. Le symbole *x* désigne l'épaisseur de la cible, ΔE la perte d'énergie dans le gaz, *E/A* l'énergie moyenne du projectile à l'intérieur de la cible, *S* le pouvoir d'arrêt correspondant et $\Delta S/S$ l'incertitude relative sur le pouvoir d'arrêt.

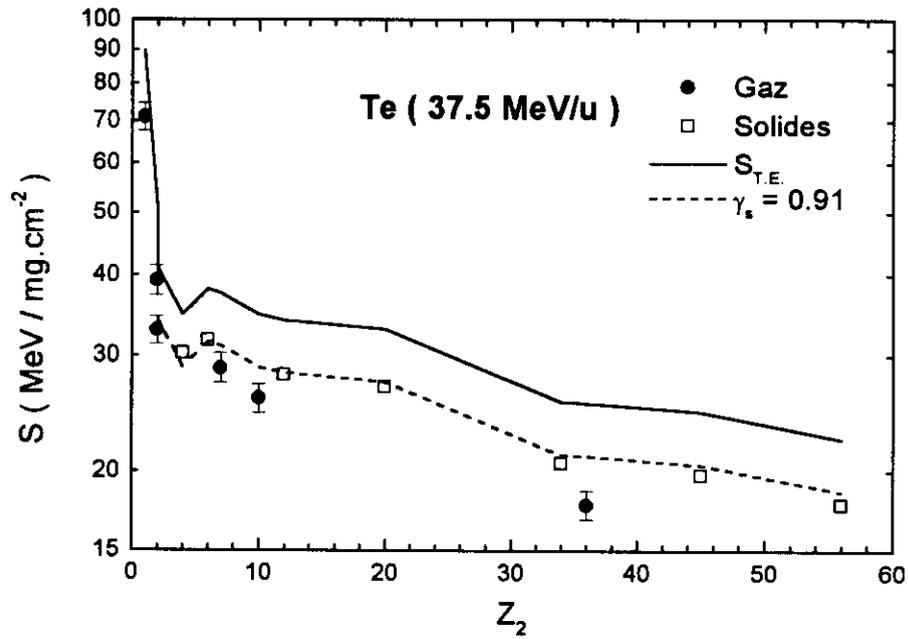


Figure 1. Comparaison des pouvoirs d'arrêt des solides et des gaz pour les ions de Te à 37.5 MeV/u. Les pouvoirs d'arrêt expérimentaux des gaz (présent travail) sont représentés par des symboles fermés et ceux des solides (réf. [1]) par des symboles ouverts. La ligne en trait plein représente un calcul des pouvoirs d'arrêt sous l'hypothèse de l'épluchage total des ions (T.E.) et la ligne en pointillé représente une paramétrisation des pouvoirs d'arrêt des solides utilisant la valeur indiquée du paramètre de charge effective γ_e .

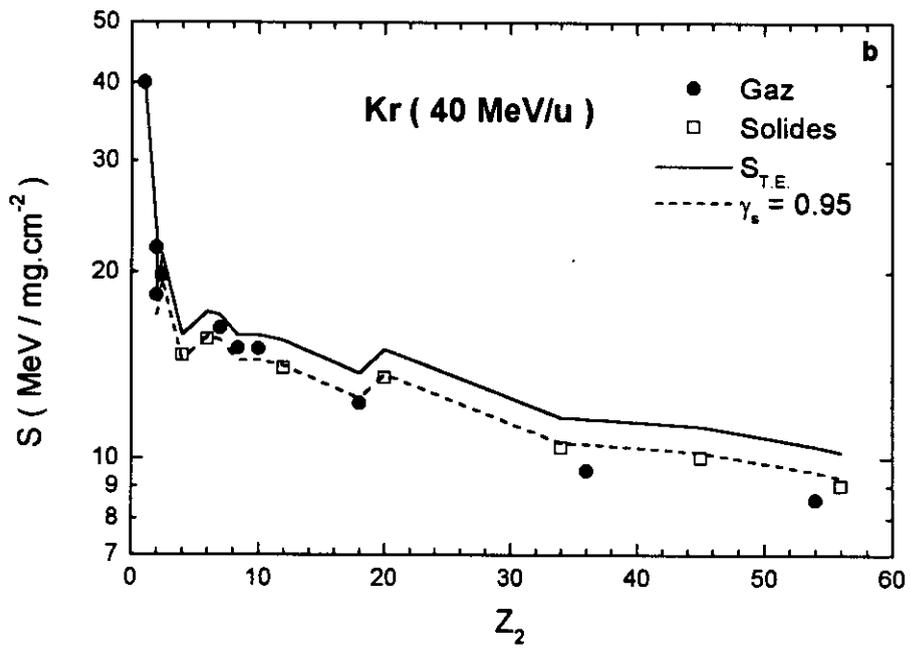
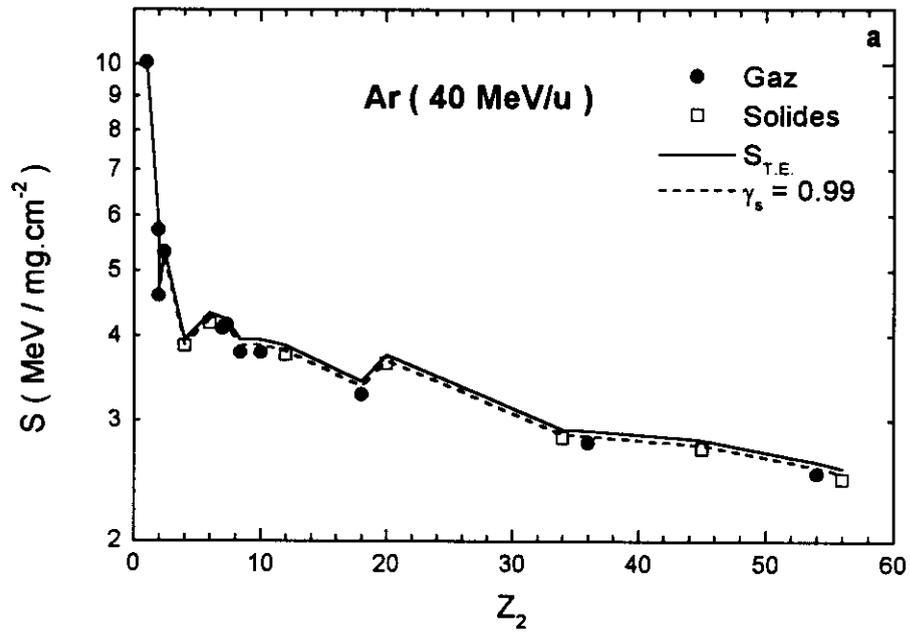


Figure 2. Légende identique à celle de la figure 1

a - projectile : Ar à 40 MeV/u

b - projectile : Kr à 40 MeV/u

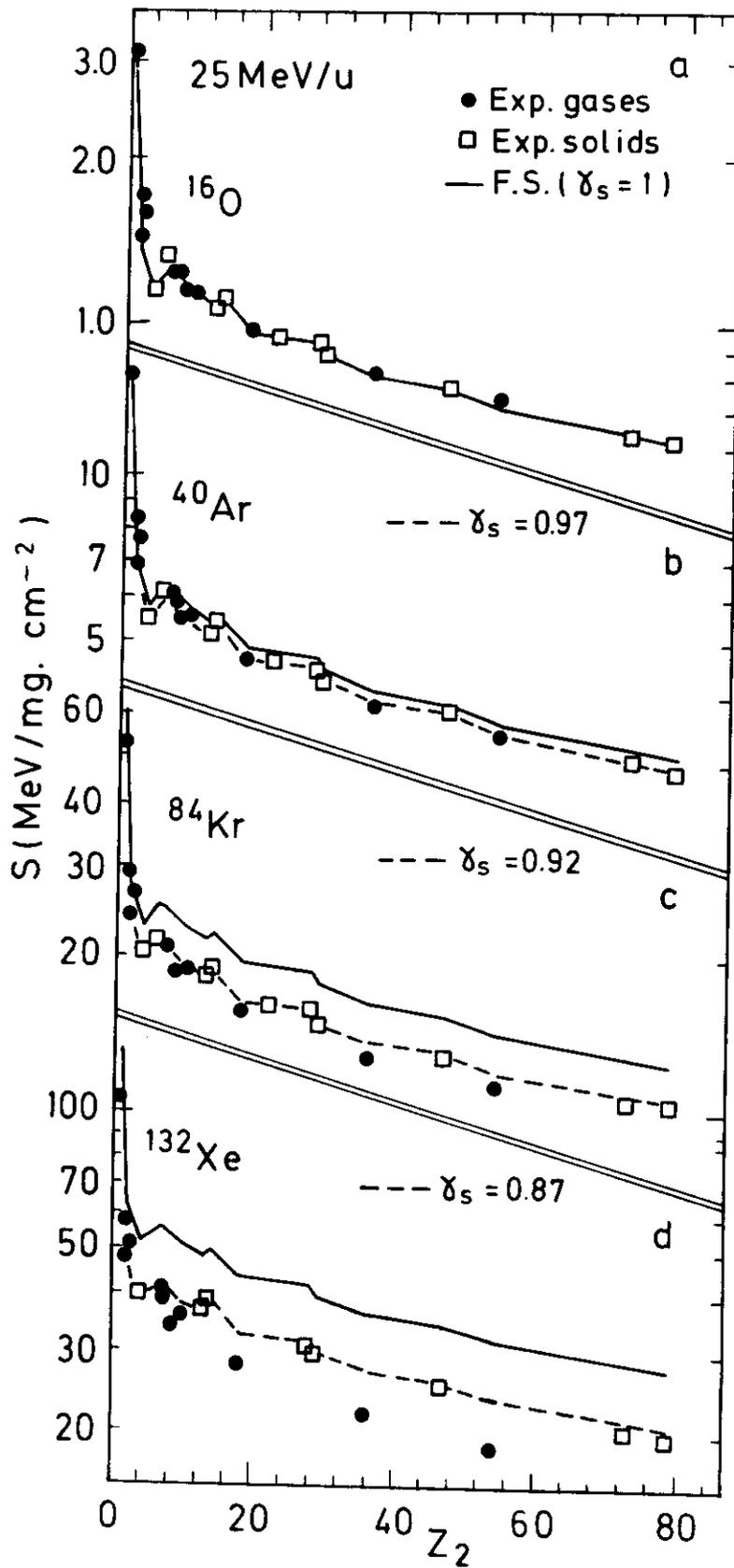


Figure 3. Légende identique à celle de la figure 1 pour les ions O, Ar, Kr et Xe à 25 MeV/u.

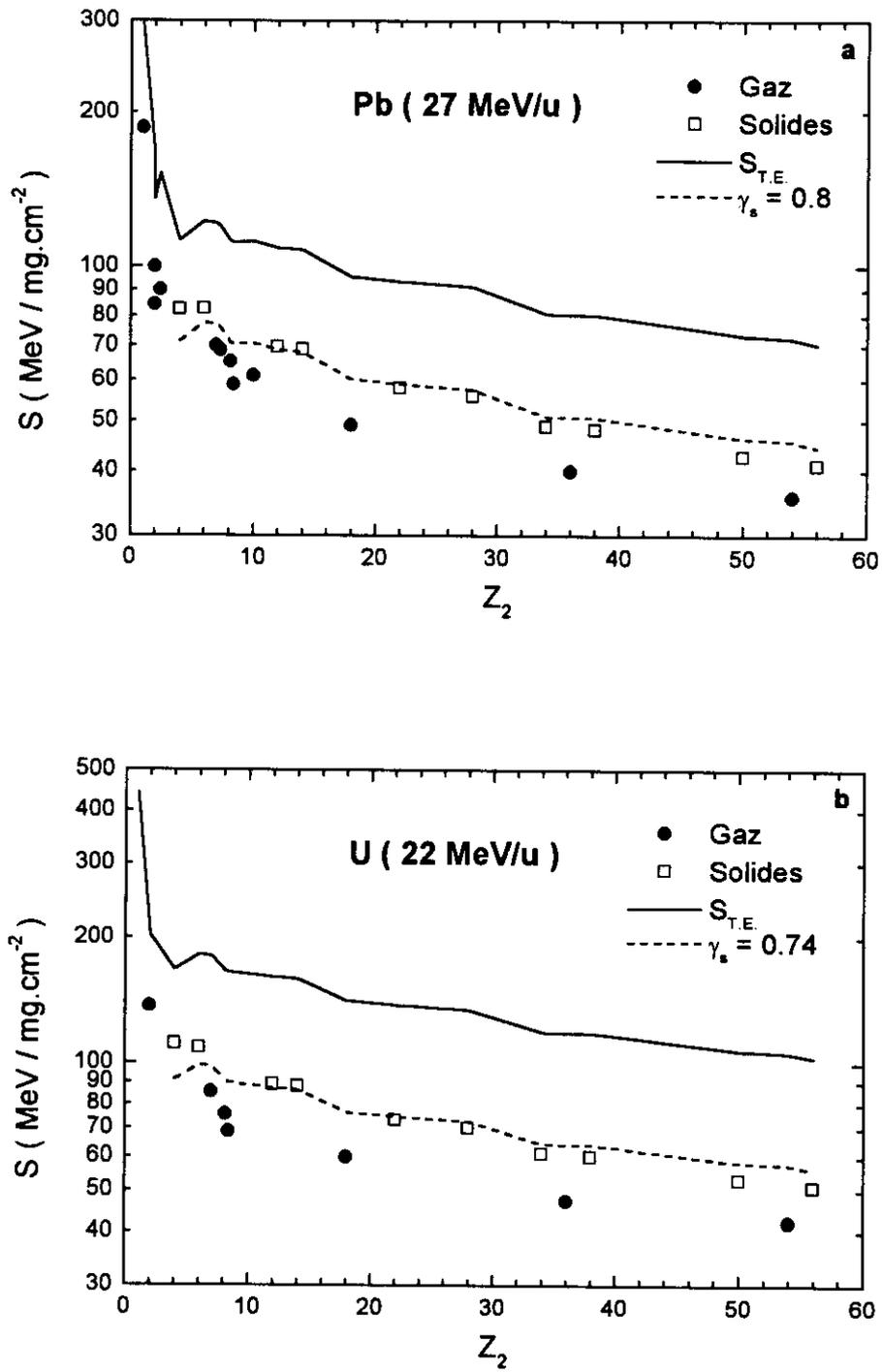


Figure 4. Légende identique à celle de la figure 1
 a - projectile : Pb à 27 MeV/u
 b - projectile : U à 22 MeV/u

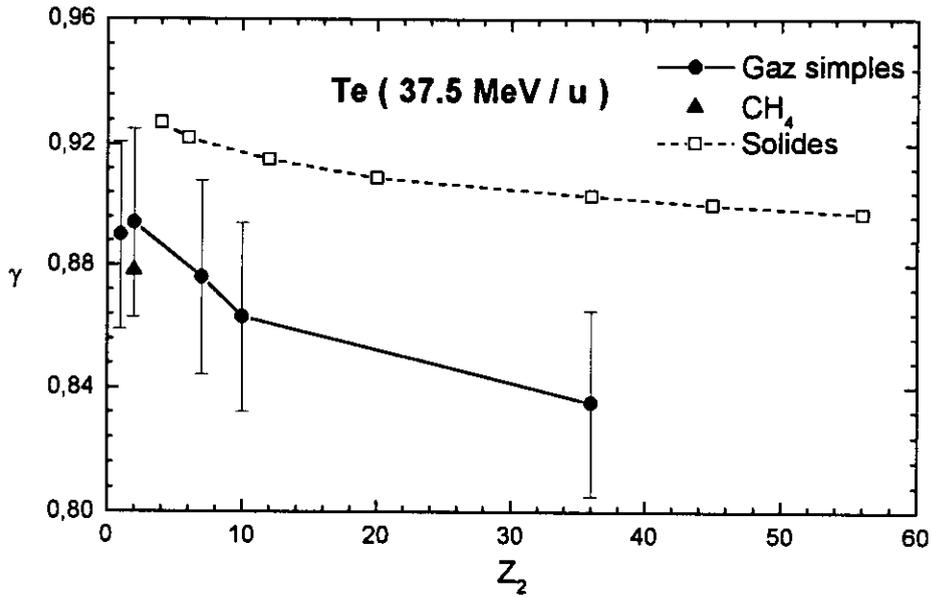


Figure 5. Evolution de la charge effective γ des ions Te à 37.5 MeV/u dans les gaz (symboles fermés associés à des barres d'erreur) en fonction du numéro atomique Z_2 du ralentisseur. Les symboles carrés représentent les valeurs de la charge effective du tellure dans les solides. Les lignes sont tracées pour guider l'oeil.

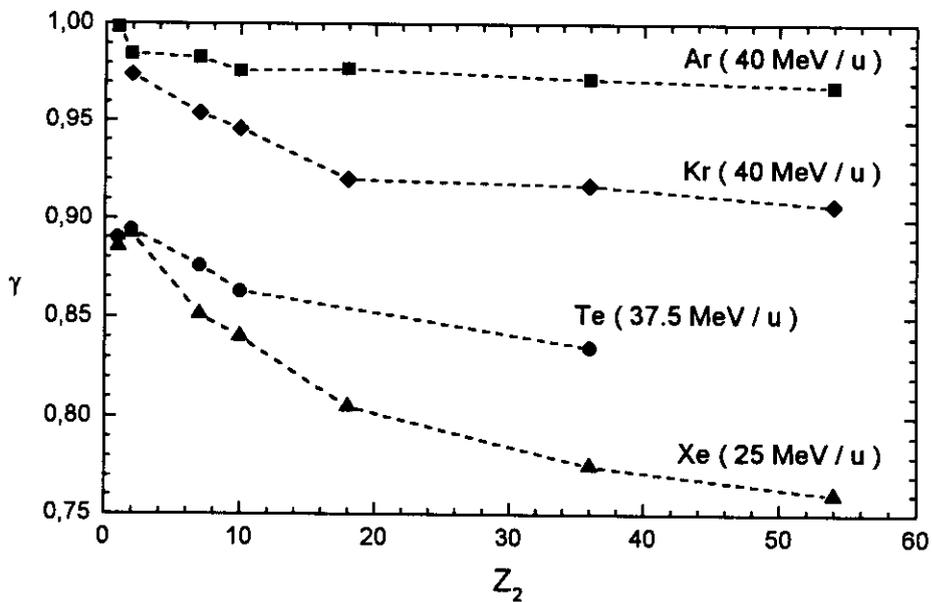


Figure 6. Variation du paramètre de charge effective γ en fonction du numéro atomique Z_2 de la cible pour différents ions de 25 à 40 MeV/u. Les lignes en pointillé sont des guides pour l'oeil.