

FR 820.1014

CHALCOGENURES DES ELEMENTS TRANSURANIENS  
CRISTALLOCHIMIE ET ETUDE PAR SPECTROMETRIE MOSSBAUER  
DES CHALCOGENURES DE NEPTUNIUM 237

T. THEVENIN<sup>1</sup> - M. PAGES<sup>1</sup> et D. DAMIEN<sup>2</sup>

---

- 1 - Laboratoire Curie, 11 rue Pierre et Marie Curie  
75231 PARIS CEDEX 05 - France
- 2 - SEMA - Département d'Etudes de Combustibles à  
base de Plutonium - Centre d'Etudes Nucléaires  
B.P. n° 6 - 92260 FONTENAY-AUX-ROSES - FRANCE -

Colloque international du Centre national de la recherche scientifique : Chimie et physique des sulfures, seleniures et telliures à l'état solide.  
Paris, France, 14 - 17 Septembre 1981.

CEA - CONF 5904

## I - INTRODUCTION

Les éléments transuraniens se caractérisent par le remplissage progressif de la sous couche 5 f et forment ainsi une série présentant des similitudes avec la série des terres rares qui résulte du remplissage progressif de la sous couche 4 f. Les électrons 4 f écrantent le potentiel positif du noyau vu par les électrons de valence et il ne s'ensuit qu'une variation faible et monotone quand on passe d'un élément au suivant.

Les premiers travaux sur les actinides concernaient des composés ioniques ( $An F_3$ ,  $An F_4$ ) et on a déduit que les éléments 5 f constituaient une famille homologue de celle des 4 f et qu'il existait une contraction actinidique semblable à la contraction lanthanidique. Ensuite, la préparation des métaux actinides purs, U, Np, Pu et leur étude cristallographique ont montré que leurs structures étaient complexes, caractérisées par plusieurs formes allotropiques différentes de celles des métaux lanthanides. D'autre part, les variations des rayons métalliques (fig. 1) des actinides présentent un minimum au neptunium. On ne retrouve une structure cristalline analogue aux terres rares qu'à partir de l'américium.

L'ensemble des propriétés physiques des métaux actinides révèle que les électrons 5 f, tout au moins au début de la série, sont fortement délocalisés et hybridés aux électrons d. Il était intéressant d'étudier le comportement des électrons 5 f dans des systèmes intermédiaires entre les métaux purs et les composés typiquement ioniques comme les fluorures. Nous avons choisi d'étudier la cristallographie des chalcogénures et pnictures des éléments transuraniens car on pouvait penser provoquer des variations progressives de leurs propriétés en passant d'un anion à un autre,

selon leur appartenance au groupe V (S, Se, Te) ou au groupe VI (P, As, Sb), selon leur rayon cristallin et leur charge électrique. Nous présentons ici les résultats acquis en cristallographie sur les chalcogénures de transuraniens au CEA à Fontenay-aux-Roses et les résultats d'études de spectrométrie Mössbauer sur les chalcogénures de  $^{237}\text{Np}$  effectuées au Laboratoire Curie à Paris.

## II - TECHNIQUES EXPERIMENTALES

Les isotopes utilisés dans la synthèse des chalcogénures de transuraniens sont :  $^{237}\text{Np}$ ,  $^{239}\text{Pu}$ ,  $^{241-243}\text{Am}$ ,  $^{244-248}\text{Cm}$ ,  $^{249}\text{Bk}$ ,  $^{249}\text{Cf}$ . Toutes les manipulations sont effectuées en boîte à gants. Toutefois des protections supplémentaires (verres au plomb, blindages...) sont nécessaires pour la manipulation des transamériciens.

La méthode générale de préparation des chalcogénures est une réaction solide-gaz entre l'élément transuranien (à l'état de métal ou d'hydrure) et l'élément chalcogène. La réaction s'effectue en tube de pyrex ou de quartz scellé sous vide pour  $^{237}\text{Np}$ ,  $^{239}\text{Pu}$  et  $^{241}\text{Am}$ . Par contre, du Cm au Cf, pour lesquels les quantités mises en jeu sont de l'ordre de quelques dizaines de  $\mu\text{g}$ , la réaction s'effectue dans des capillaires de quartz. L'identification des composés obtenus se fait par diffraction de rayons X sur des échantillons polycristallins en raisonnant par isotype avec des composés homologues de terres rares ou d'uranium. Seuls  $\text{AmTe}_{1.73}$  / 1 / et  $\text{NpS}_3$  / 2 / ont été obtenus à l'état de monocristaux.

$\text{NpS}_3$ ,  $\text{NpSe}_3$ ,  $\text{Np}_3(\text{S}_5, \text{Se}_5)$  / 2 / et  $\text{NpTe}_{2.0}$  / 3 / ont été étudiés par spectrométrie Mössbauer de  $^{237}\text{Np}$ .

### III - CHALCOGENURES D'ACTINIDES

Nous avons réuni dans le tableau 1, les chalcogénures de transuraniens synthétisés à ce jour. Si on examine la composition des produits formés et leur structure cristalline, on remarque que :

- du Pu au Cf, les chalcogénures formés sont de types chalcogénures de terres rares et l'élément transuraniien est principalement trivalent ;

- et que le neptunium (dans les sulfures et les sélénures) a un comportement intermédiaire entre uranium et plutonium. En effet, dans les composés isostructuraux de ceux de l'uranium, il est tétravalent, tandis qu'il est trivalent dans les composés isostructuraux de ceux du plutonium.

#### 3.1 - Chalcogénures de neptunium

-  $\text{NpX}_3$  (X = S, Se) :

Les trisulfure et triséniure de Np cristallisent dans un système monoclinique et possèdent la structure  $\text{Zr Se}_3$  qui semble caractéristique de cations tétravalents (on la rencontre aussi pour Hf ( $\text{S}_3$ ,  $\text{Se}_3$ ) ou Th ( $\text{S}_3$ ,  $\text{Se}_3$ ). L'existence de polyions  $(\text{Se-Se})^=$  dans cette structure et l'isotypie avec  $\text{UX}_3$  (X = S, Se) conduisent à considérer le neptunium comme tétravalent dans ces polychalcogénures avec pour formule générale  $\text{Np}^{4+} (\text{X-X})^= \text{X}^=$ . La valeur du déplacement isomérique de  $\text{NpS}_3$  mesuré par spectrométrie Mössbauer est en bon accord avec un état de charge +4 pour le neptunium (fig. 2). Des mesures de résistivité / 23 / ont montré que  $\text{NpSe}_3$  est un semi-conducteur à fort gap. En utilisant la méthode de transport chimique ( $\text{Br}_2$  : agent transporteur), des cristaux de  $\text{NpS}_3$  ont été obtenus / 2 /.

- NpTe<sub>3</sub> :

Le tritellurure est isotype de NdTe<sub>3</sub> (maille orthorhombique pseudo-quadratique) / 24 /. Le neptunium possède donc vraisemblablement l'état de charge + 3 puisque UTe<sub>3</sub> présente une structure différente (de type ZrSe<sub>3</sub>).

- Np<sub>3</sub>X<sub>5</sub>, (X = S, Se) :

Ces composés cristallisent dans un système orthorhombique et possèdent la structure U<sub>3</sub>S<sub>5</sub> / 25, 26 /. Dans cette structure, on distingue deux sites cristallographiques différents, ce qui permet d'écrire la formule générale M<sub>2</sub> (III) M (IV) X<sub>5</sub> (M = U, Np ; X = S, Se). Une telle distribution de charges a été confirmée par l'existence de UPu<sub>2</sub>S<sub>5</sub>, UCe<sub>2</sub>S<sub>5</sub>, UGd<sub>2</sub>S<sub>5</sub>, ThPu<sub>2</sub>S<sub>5</sub> préparés par MARCON / 6 /. La figure 3 montre le spectre Mössbauer de Np<sub>3</sub>S<sub>5</sub> à 77 K : on observe deux éclatements quadrupolaires avec deux déplacements isomériques caractéristiques de deux ions Np de valence différente (Fig.2). De plus à 4.2 K, le rapport des aires des multiplets S(Np<sup>III</sup>) / S(Np<sup>IV</sup>) est égal à 2. Ce rapport correspond bien au rapport du nombre d'ions trivalents au nombre d'ion tétravalent obtenu par cristalochimie.

- Np<sub>2</sub>X<sub>5</sub> (X = S, Se) :

La structure est du type Th<sub>2</sub>S<sub>5</sub> / 27 /. La maille est orthorhombique pseudo-quadratique. On peut considérer ces composés comme des polychalcogénures de formule M<sub>2</sub><sup>4+</sup> (X - X)<sup>-</sup>X<sub>3</sub><sup>=</sup>. Une mesure récente de la susceptibilité magnétique de Np<sub>2</sub>Se<sub>5</sub> a montré que ce composé est ferromagnétique au-dessous de 15 K et paramagnétique au-dessus / 11 /. Des études Mössbauer qui sont en cours devraient permettre de confirmer la tétravalence du Np.

-  $\text{Np}_2\text{X}_3$  (X = S, Se, Te) :

$\text{Np}_2\text{S}_3$  a été présenté comme isotype de  $\text{U}_2\text{S}_3$  par ZACHARIASEN / 7 / comme isotype de  $\text{La}_2\text{S}_3$  par MARCON / 6 /. Tous les autres sesquichalcogénures de neptunium sont de type  $\text{La}_2\text{S}_3$ .

-  $\text{NpX}$  (X = S, Se, Te) :

La structure est de type NaCl comme celle des monochalcogénures de terres rares ou d'uranium. On ne peut donc pas, de la structure, déduire la valence du neptunium. Nous avons représenté sur la figure 4, la variation des paramètres de maille des monochalcogénures de lanthanides et d'actinides. Pour les lanthanides, on observe la contraction lanthanidique classique, tandis que les variations sont irrégulières pour les actinides. Le rayon cristallin des cations  $\text{An}^{4+}$  étant inférieur à celui des cations  $\text{An}^{3+}$ , les valeurs des paramètres de maille des composés de Np tendent à montrer que la valence du neptunium est ici comprise entre 3 et 4.

3.2 - CHALCOGENURES DE Pu, Am, Cm Bk, Cf

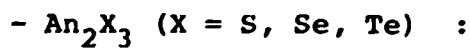
-  $\text{AnTe}_3$  :

Ils existent du Pu au Cf et sont du type  $\text{NjTe}_3$  observé pour toutes les terres rares trivalentes.

-  $\text{AnX}_2 - x$  (X = S, Se, Te) :

Les structures des dichalcogénures dérivent de la structure quadratique de type anti- $\text{Fe}_2\text{As}$ . Pour les sulfures et sélénures, des variations de composition peuvent provoquer des déformations de la structure quadratique : par exemple  $\text{PuS}_2$  est monoclinique (type  $\text{CeSe}_2$ ) / 6 /

tandis que  $\text{PuS}_{1.9}$  est quadratique. Ces déformations sont faibles et nécessitent des études sur monocristaux pour être confirmées. Ces composés sont des polychalcogénures de formule  $\text{An}_2^{3+} (\text{X} - \text{X})^- \text{X}^-$ . Les ditellurures ont un caractère métallique plus marqué et conservent la structure anti- $\text{Fe}_2\text{As}$ , bien qu'ils puissent être fortement sous-stoechiométriques. Le domaine de composition varie de  $\text{AnTe}_{2.0}$  à  $\text{AnTe}_{1.73}$  et cet écart à la stoechiométrie se traduit par des variations importantes du rapport axial  $\frac{c}{a}$  (de 2,03 à 2,07). La structure anti- $\text{Fe}_2\text{As}$  de  $\text{AnTe}_{1.73}$  a été vérifiée par étude sur monocristaux / 1 /. A partir du Cm, le rapport c/a reste voisin de 2,06 - 2,08 ce qui suggère que les ditellurures sont alors toujours sous-stoechiométriques (fig. 5).



Le dernier élément des transuraniens étudié étant le californium, on ne dispose pas de données sur les chalcogénures d'éléments plus lourds. Le tableau 2 indique les différents types structuraux ( $\alpha, \gamma, \eta, \xi$ ) rencontrés dans les sesquichalcogénures de transuraniens. Les sulfures présentent la forme  $\alpha$  jusqu'au Bk et la forme  $\gamma$  jusqu'au Cf. (La forme  $\alpha$  est observée du La au Dy et la forme  $\gamma$  du La au Tb). Les sesquiséléniures  $\eta$  sont observés pour le Pu, Am et Bk pour les actinides et du Gd au Dy pour les lanthanides. La forme  $\gamma$  va du Np au Cf et du La au Dy. Les sesquitellurures  $\eta$  et  $\gamma$  sont formés du Np au Cm. Le berkélium est le premier élément transuranien à avoir le type structural  $\text{Sc}_2\text{S}_3$  (forme  $\xi$ ).

- AnX (X = S, Se, Te) :

Ils ont été identifiés jusqu'au curium. Peu de mesures physiques ont été effectuées sur ces composés car ils sont difficiles à préparer purs. Particulièrement dans le cas du Np et de l'Am, les monochalcogénures ont toujours été obtenus avec les sesquichalcogénures correspondants. D'après les variations des paramètres de maille présentés figure 4, comme pour le Np les transuraniens présentent vraisemblablement une valence non entière dans leurs monochalcogénures. Cette valence reste voisine de 3 : pour Pu et Am, on peut envisager respectivement une fraction d'ions  $\text{Pu}^{4+}$  et  $\text{Am}^{2+}$  conduisant à une valence légèrement supérieure à 3 pour le plutonium et inférieure à 3 pour l'américium. La valence pour un transuranien donné varie avec l'anion qui lui est associé et on tend à favoriser des valences plus basses lorsqu'on passe du soufre au sélénium puis au tellure.

D'autre part, lorsqu'on parcourt la série des actinides, l'orbitale 5f est de plus en plus interne. La figure 6 montre, que pour un métal donné, la délocalisation des électrons 5 f diminue du soufre au tellure: les recouvrements 5f et 6 d entre atomes de métaux voisins sont plus faibles dans le cas du soufre que du tellure car il y a augmentation des distances An - An . Il existe aussi un processus de délocalisation secondaire des électrons 5 f : les recouvrements entre orbitales 5 f de l'actinide et orbitales np de l'anion qui augmentent du soufre au tellure / 10 /.

La compétition entre ces 2 types de délocalisation permet également d'interpréter les variations des paramètres de maille des monochalcogénures d'actinides.



IV - CONCLUSION

L'OUTIL : SPECTROMETRIE MÖSSBAUER ( $^{237}\text{Np}$ )  
 DANS L'ETUDE DES CHALCOGENURES  
 D'ACTINIDES

La résonance Mössbauer dans le  $^{237}\text{Np}$  est un outil utilisé par les chimistes et les physiciens dans l'étude des composés d'actinides. Les déplacements isomériques mesurés donnent plus d'informations de caractère chimique pour le  $^{237}\text{Np}$  que pour  $^{57}\text{Fe}$  et  $^{119}\text{Sn}$ , puisque les différents degrés d'oxydation du neptunium (+7, +6, +5, +4, +3) ont un effet très important sur les déplacements isomériques qui s'étendent de  $(-81 \pm 1) \text{ mm s}^{-1} \text{ Np}^{\text{VII}}$ , à  $(38 \pm 1) \text{ mm s}^{-1} \text{ Np}^{\text{III}}$  par rapport à  $\text{NpAl}_2$ .

Dans l'étude des chalcogénures, nous avons vu que la valeur du déplacement isomérique de  $\text{NpS}_3$  a confirmé la tétravalence du neptunium dans ce composé. Les résultats obtenus pour  $\text{Np}_3\text{S}_5$  (les études sont en cours pour  $\text{Np}_3\text{Se}_5$ ) ont montré la coexistence des deux états de charge +3 et +4 dans ce composé : ceci est en bon accord avec les deux sites cristallographiques distincts déterminés par cristallographie. Pour d'autres chalcogénures de neptunium tels que  $\text{NpTe}_2$  / 3 /,  $\text{Np}_{1+x}\text{Mo}_6\text{Se}_8$  / 31 /, l'état de charge 3+ du neptunium a été confirmé.

Outre son aspect chimique présenté ici pour les chalcogénures de neptunium, l'effet Mössbauer permet l'étude des interactions magnétiques hyperfines. Les résultats obtenus, concernant ces interactions, sur  $\text{NpX}_3$  (X = S, Se),  $\text{Np}_3\text{X}_5$  (X = S, Se) seront présentés ultérieurement / 2 /.

## BIBLIOGRAPHIE

- / 1 / J.H. BURNS, D. DAMIEN, R.G. HAIRE  
Acta Cryst. B35, 143 (1979)
- / 2 / T. THEVENIN  
Thèse 3ème cycle en cours
- / 3 / M. BOGE, J. CHAPPERT, L. ASCH, G.M. KALVIUS,  
A. BLAISE, J.M. FOURNIER, D. DAMIEN, A. WOJAKOWSKI  
Communication présentée a Actinides 1981 Conference  
Pacific Grove (Californie) - Sept. 1981
- / 4 / M. PICON, J. FLAHAUT  
Bull. Soc. Fr. 772 (1958)
- / 5 / F. GRONVOLD, H. HARALDSEN, T. THURMANN-MOE, T. TUFFE  
J. Inerg. Nucle. Chem. 30, 2117 (1968)
- / 6 / J.P. MARCON  
Rapport CEA - R 3319 (1969)
- / 7 / W. H. ZACHARIASEN  
Acta Cryst. 2, 291 (1949)
- / 8 / J.P. MARCON  
C.R. Acad. Sc. Paris 265 série C, 235 (1967)
- / 9 / P. KHODADAD  
Bull. Soc. Chim. Fr. 133 (1961)
- / 10 / D. DAMIEN  
Thèse d'état (1976)
- / 11 / T. THEVENIN, M. PAGES, A. WOJAKOWSKI  
J. Inorg. Nucl. Chem.
- / 12 / E. W. BREEZE, N.H. BRETT, J. WHITE  
J. Nucl. Mat. 39, 157 (1971)
- / 13 / A.J. KLEIN HANEVELD, F. JELLINEK  
J. Less Com. Metals, 21, 45 (1976)
- / 14 / R. FERRO  
Z. Anorg. Allgem. Chem. 275, 320 (1954)

- / 15 / L.K. MATSON, J.W. MOODY, R.C. HIMES  
J. Inorg. Nucl. Chem. 25, 795 (1963)
- / 16 / A.W. MITCHELL, D.J. LAM  
J. Nucl. Mat. 39, 219 (1971)
- / 17 / M. ALLBUTT, A.R. JUNKISON  
AERE-R 5541 (1967)
- / 18 / A.E. GORUM  
Acta Cryst. 10, 144 (1957)
- / 19 / D. DAMIEN, R. G. HAIRE, J.R. PETERSON  
J. de Phys. 40, C4 - 95 (1979)
- / 20 / D. DAMIEN, J. JOVE  
Inorg. Nucl. Chem. Letters 7, 685 (1971)
- / 21 / D. DAMIEN, J.P. CHARVILLAT, W. MÜLLER  
Inorg. Nucl. Chem. Letters 11, 451 (1975)
- / 22 / D. DAMIEN,  
J. Inorg. Nucl. Chem. 36, 307 (1974)
- / 23 / A. BLAISE  
Communication personnelle
- / 24 / B. K. NORLING, H. STEINFINK  
Inorg. Chem. 5, 9, 1488 (1966)
- / 25 / M. POTEL  
Thèse 3ème cycle, Rennes (1974)
- / 26 / P.T. MOSELEY, D. BROWN, B. WHITTAKER  
Acta. Cryst. B 28, 1816 (1972)
- / 27 / H. NOEL, M. POTEL  
soumis pour publication dans Acta. Cryst.
- / 28 / G.K. JORGENSEN  
Orbitals in atoms and molecules. Académie Prec  
London and New York p. 155 (1962)
- / 29 / B.T. MATTHIAS, W.H. ZACCHARIASEN  
Phys. Rev. Let. 18, 19, 782 (1967)
- / 30 / W.H. ZACCHARIASEN  
J. Inorg. Nucl. Chem. 35, 3487 (1973)
- / 31 / T. THEVENIN, J. GAL, J. JOVE, M. PAGES et D. DAMIEN  
(résultats non publiés).

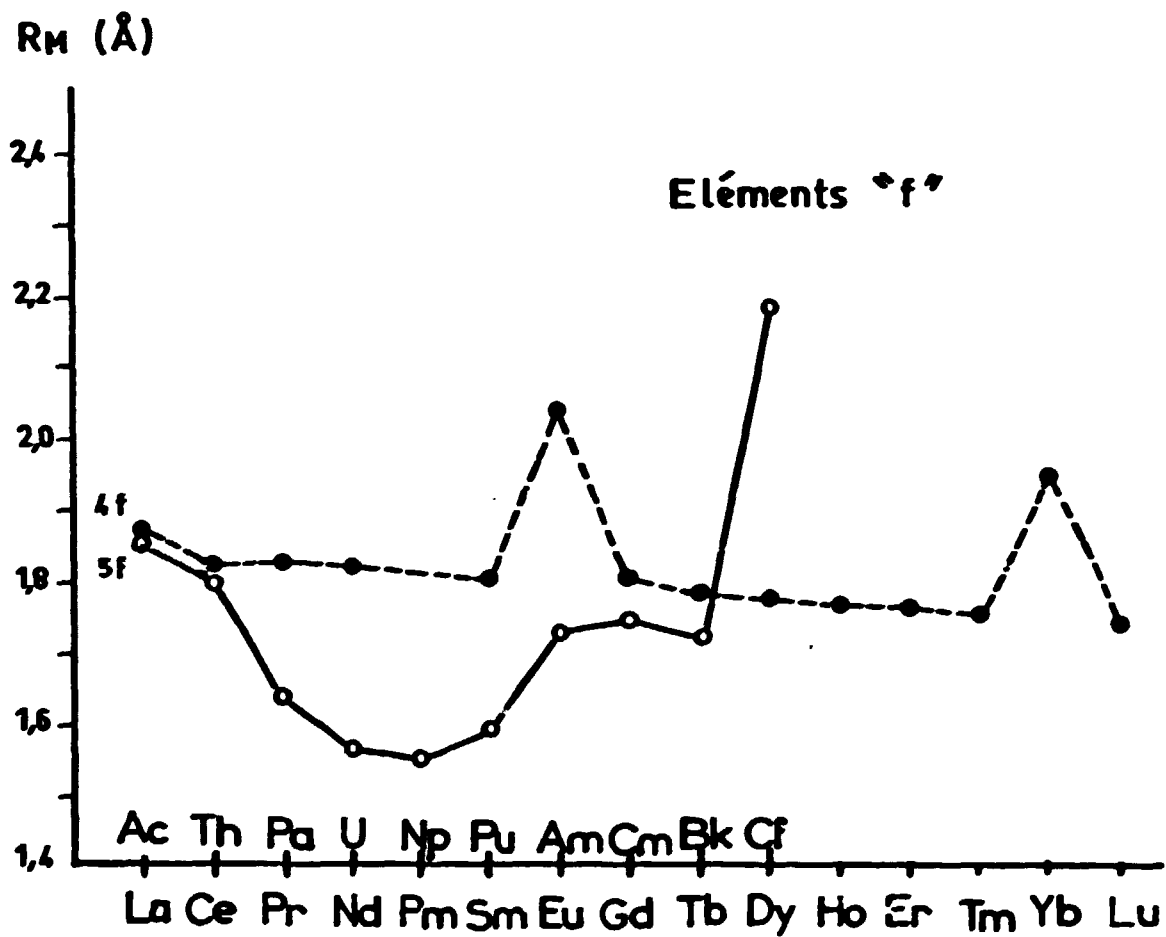
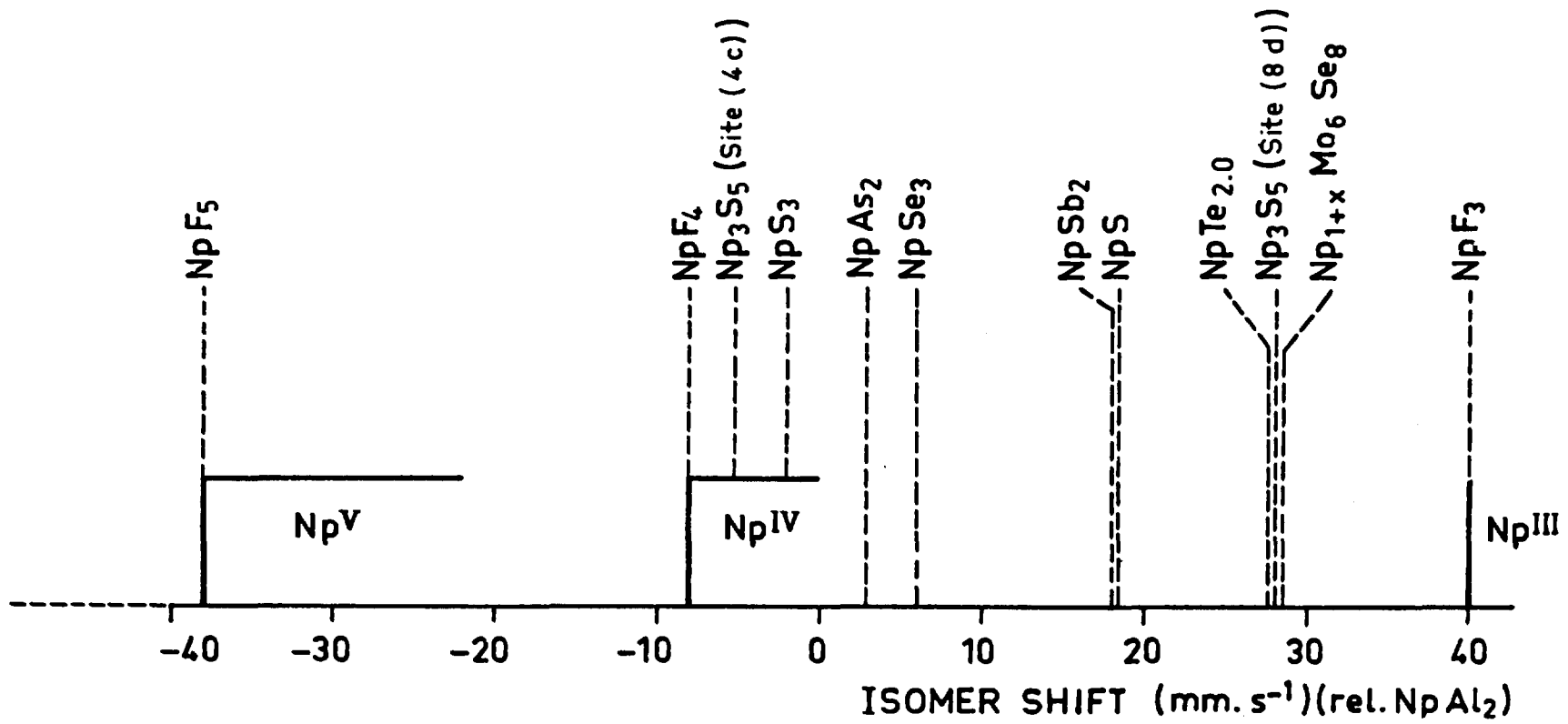


Figure 1 : Rayons métalliques des éléments 4 f et 5 f pour une coordinnence 12. (réf. 29, 30)

Figure\_2 : Déplacements isomériques de quelques chalcogénures et pnictures de neptunium 237



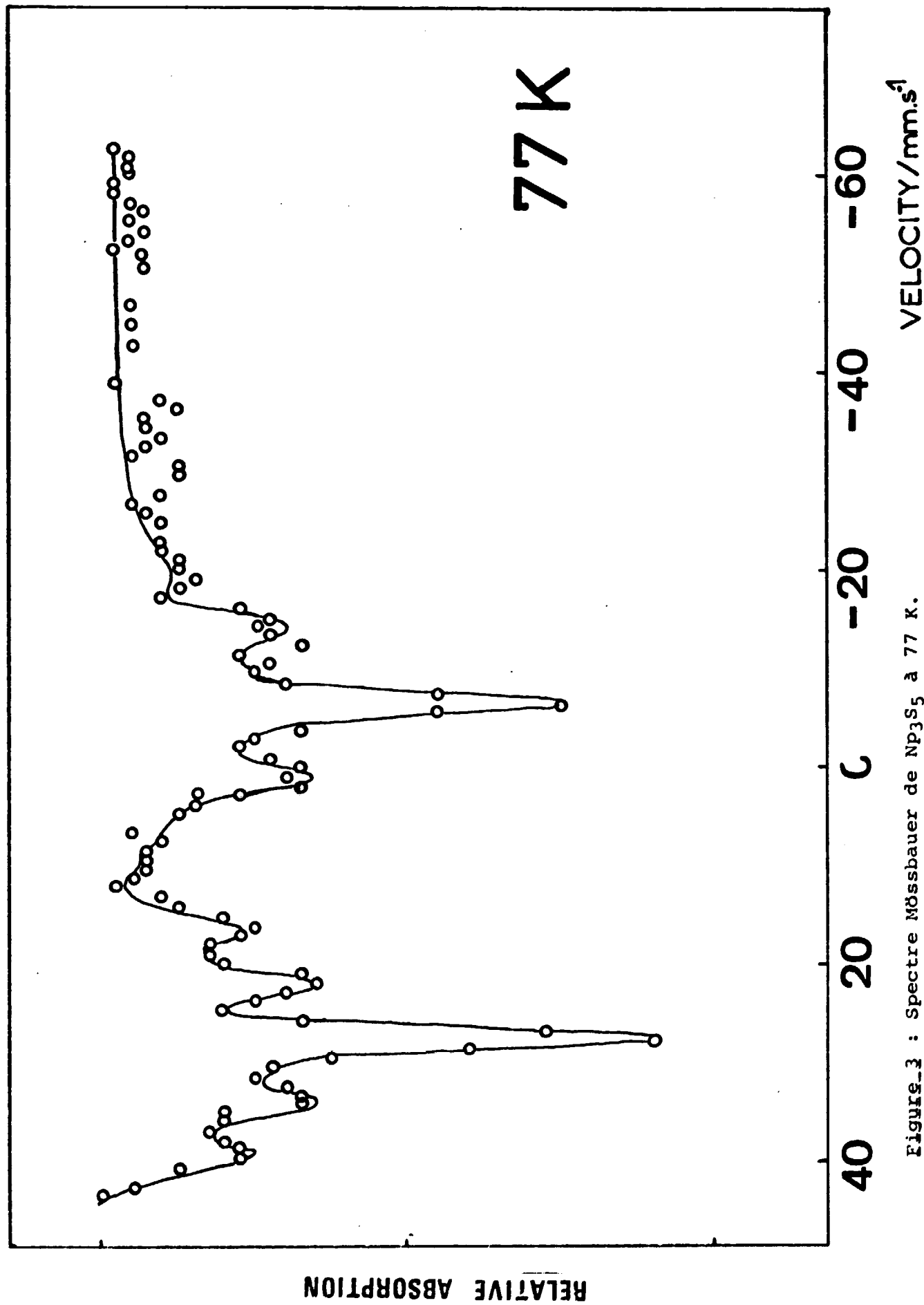


Figure 3 : Spectre Mössbauer de Np<sub>3</sub>S<sub>5</sub> à 77 K.

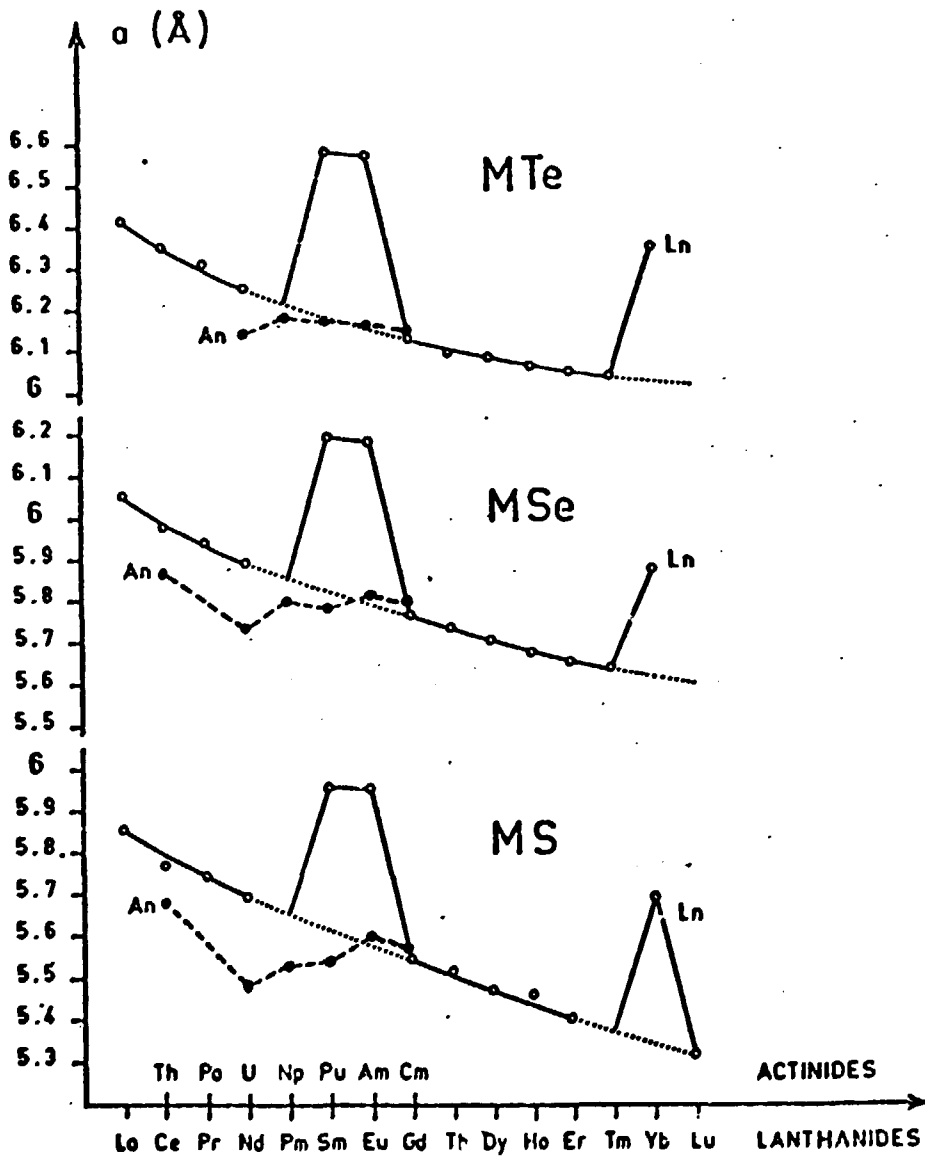


Figure 4 : Paramètres de maille des monochalcogénures d'éléments 4 f et 5 f.

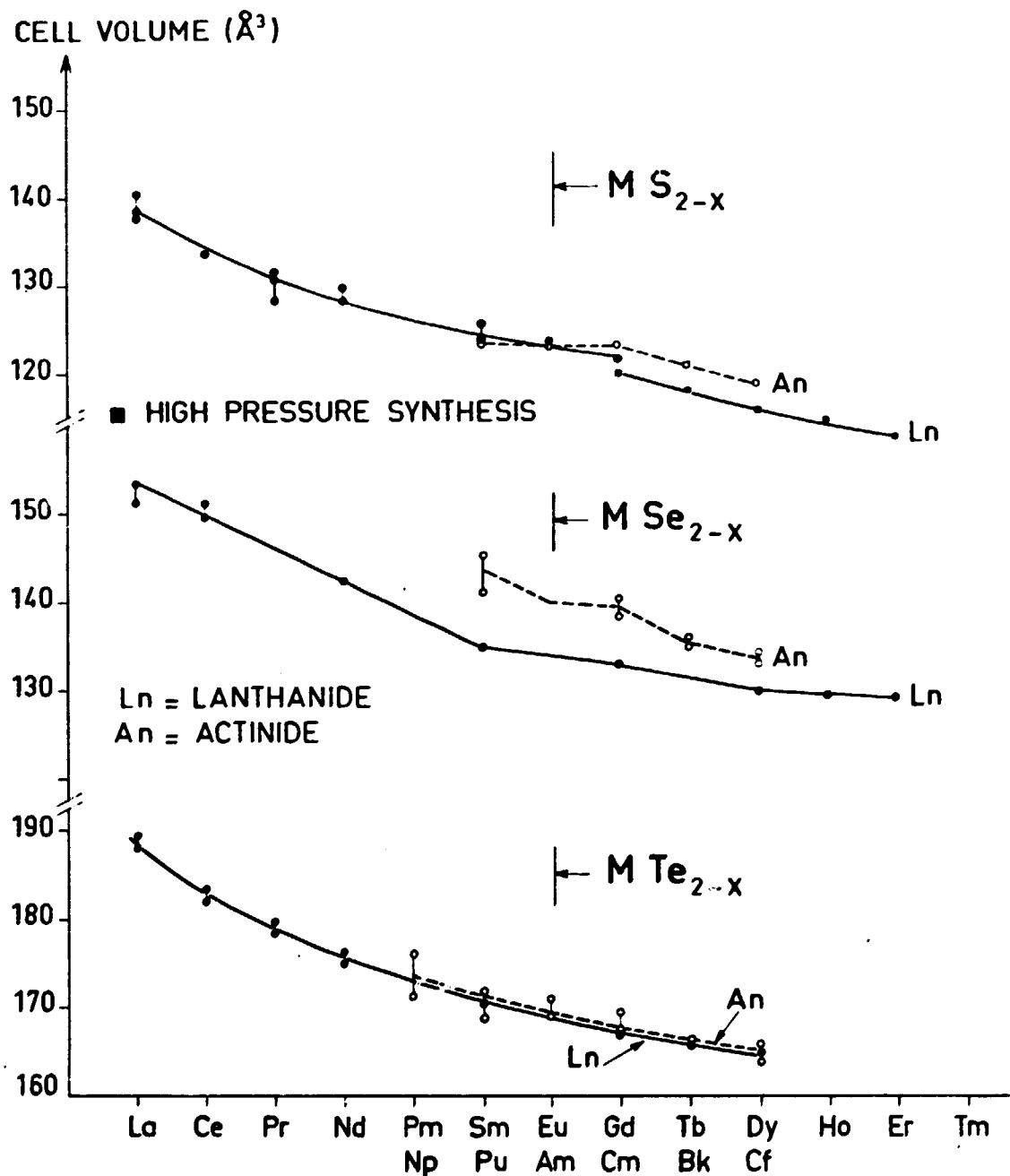


Figure 5 : Volumes molaires des dichalcogénures d'éléments 4 f et 5 f



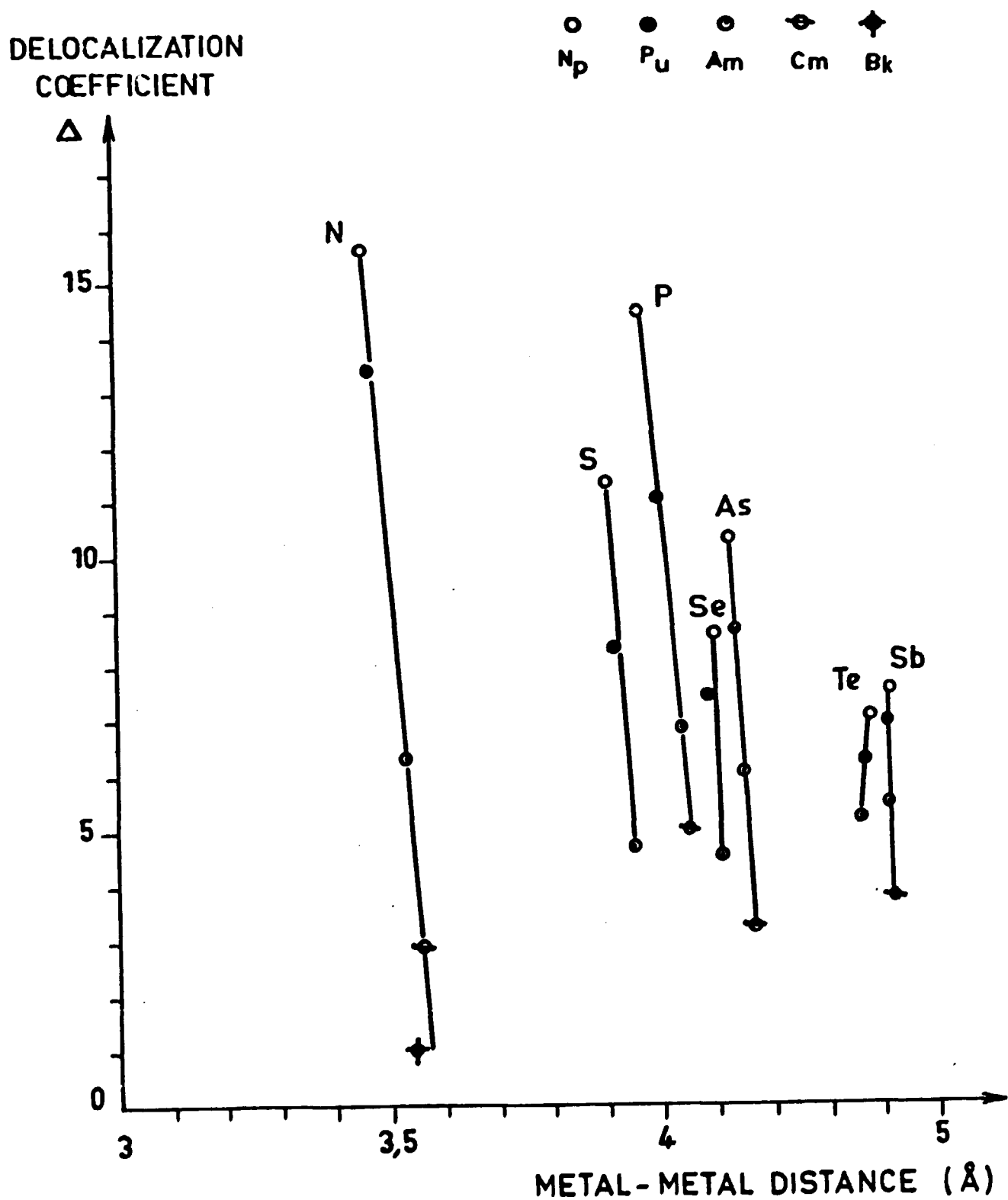


Figure 6 : Coefficients de délocalisation des monochalcogénures et monpnictures d'éléments 5 f en fonction des distances métal-métal.

COMPOSITION	U	Np	Pu	Am	Cm	Bk	Cf
MX <sub>3</sub>	:US <sub>3</sub> (4,5)	:NpS <sub>3</sub> (6)	:	:	:	:	:
	:USe <sub>3</sub> (9)	:NpSe <sub>3</sub> (10)	:	:	:	:	:
	:UTe <sub>3</sub> (12)	:NpTe <sub>3</sub> (10)	:PuTe <sub>3</sub> (10)	:AmTe <sub>3</sub> (10)	:CmTe <sub>3</sub> (10)	:BkTe <sub>3</sub> (19)	:CfTe <sub>3</sub> (19)
M <sub>2</sub> X <sub>5</sub>	:U <sub>2</sub> S <sub>5</sub> (6)	:Np <sub>2</sub> S <sub>5</sub> (6)	:	:	:	:	:
	:U <sub>2</sub> Se <sub>5</sub>	:Np <sub>2</sub> Se <sub>5</sub> (11)	:	:	:	:	:
MX <sub>2</sub>	:US <sub>2</sub> - x (4,5)	:	:PuS <sub>2</sub> - x (6)	:AmS <sub>2</sub> - x (20)	:CmS <sub>2</sub> - x (21)	:BkS <sub>2</sub> - x (19)	:CfS <sub>2</sub> - x (19)
	:USe <sub>2</sub> - x (9)	:	:PuSe <sub>2</sub> - x (6)	:AmSe <sub>2</sub> - x (20)	:CmSe <sub>2</sub> - x (21)	:BkSe <sub>2</sub> - x (19)	:CfSe <sub>2</sub> - x (19)
	:UTe <sub>2</sub> - x (13,14)	:NpTe <sub>2</sub> - x (22)	:PuTe <sub>2</sub> - x (17)	:AmTe <sub>2</sub> - x (10)	:CmTe <sub>2</sub> - x (10)	:BkTe <sub>2</sub> - x (19)	:BkTe <sub>2</sub> - x (19)
M <sub>3</sub> X <sub>5</sub>	:U <sub>3</sub> S <sub>5</sub> (4)	:Np <sub>3</sub> S <sub>5</sub> (6)	:	:	:	:	:
	:U <sub>3</sub> Se <sub>5</sub> (9)	:Np <sub>3</sub> Se <sub>5</sub> (10)	:	:	:	:	:
M <sub>2</sub> X <sub>3</sub>	:U <sub>2</sub> S <sub>3</sub> (7)	:α,β,γ Np <sub>2</sub> S <sub>3</sub> (6,8)	:α,β,γ Pu <sub>2</sub> S <sub>3</sub> (6)	:α,β,γ Am <sub>2</sub> S <sub>3</sub> (10)	:α,β,γ Cm <sub>2</sub> S <sub>3</sub> (10)	:α,β,γ Bk <sub>2</sub> S <sub>3</sub> (19)	:γ Cf <sub>2</sub> S <sub>3</sub> (19)
	:U <sub>2</sub> Se <sub>3</sub> (9)	:γ Np <sub>2</sub> Se <sub>3</sub> (10)	:η Pu <sub>2</sub> Se <sub>3</sub> (6)	:η,δ Am <sub>2</sub> Se <sub>3</sub> (10)	:γ Cm <sub>2</sub> Se <sub>3</sub> (10)	:η,δ Bk <sub>2</sub> Se <sub>3</sub> (19)	:γ Cf <sub>2</sub> Se <sub>3</sub> (19)
	:γ U <sub>2</sub> Te <sub>3</sub> (15)	:γ Np <sub>2</sub> Te <sub>3</sub> (16)	:η,δ Pu <sub>2</sub> Te <sub>3</sub> (17)	:η,δ Am <sub>2</sub> Te <sub>3</sub> (10)	:η,δ Cm <sub>2</sub> Te <sub>3</sub> (10)	:ε Bk <sub>2</sub> Te <sub>3</sub> (19)	:
M X	:US (7)	:NpS (6)	:PuS (6)	:AmS (10)	:CmS (10)	:	:
	:USe (9)	:NpSe (10)	:PuSe (6)	:AmSe (10)	:CmSe (10)	:	:
	:UTe (14)	:NpTe (10)	:PuTe (18)	:AmTe (10)	:CmTe (10)	:	:

Tableau 1 : CHALCOGENURES de TRANSURANIENS

	La	Ce	Pr	Nd	Pm	Sm	Eu	Gd	Tb	Dy	Ho	Er	Tm	Yb	Lu
				U	Np	Pu	Am	Cm	Bk	Cf					
$\text{Ln}_2\text{S}_3$	← $\gamma$ →						← $\gamma$ →				← $\delta$ →			← $\epsilon$ →	
	← $\alpha$ →						← $\alpha$ →								
$\text{An}_2\text{S}_3$							← $\gamma$ →								
							← $\alpha$ →								
$\text{Ln}_2\text{Se}_3$	← $\gamma$ →						← $\gamma$ →				← $\xi$ →				
							← $\eta$ →								
$\text{An}_2\text{Se}_3$							← $\gamma$ →								
							← $\eta$ →								
$\text{Ln}_2\text{Te}_3$	← $\gamma$ →						← $\eta$ →				← $\xi$ →				
							← $\eta$ →								
$\text{An}_2\text{Te}_3$							← $\eta$ →				← $\xi$ →				
							← $\gamma$ →								

$\alpha$  = ORTHORHOMBIQUE ;  $\gamma$  = CUBIQUE CENTREE TYPE ANTI- $\text{Th}_3\text{P}_4$  ;  $\delta$  = MONOCLINIQUE

$\epsilon$  = RHOMBOEDRIQUE TYPE  $\alpha$  -  $\text{Al}_2\text{O}_3$  ;  $\eta$  = ORTHORHOMBIQUE TYPE  $\text{U}_2\text{S}_3$  ;  $\xi$  = ORTHORHOMBIQUE TYPE  $\text{Sc}_2\text{S}_3$

Tableau 2 : Types structuraux rencontrés dans les sesquichalcogénures d'éléments 4 f et 5 f.