



# *Manuel de FDMNES*

Yves Joly

yves.joly@grenoble.cnrs.fr  
Institut Néel, CNRS, Bât. F, BP 166  
38042 Grenoble Cedex 9, France

Février 2009



# Introduction

Le programme FDMNES calcule les spectres de diverses spectroscopies reliées à l'absorption réelle ou virtuelle du rayonnement X dans la matière. Il évalue les sections efficaces d'absorption des photons autour des seuils d'absorption, domaine XANES de l'EXAFS, selon toutes les conditions de polarisation rectiligne ou circulaire. De la même façon, il calcule les facteurs de structures et intensités des spectres de diffraction anormale (DAFS) ou résonante (RXS). FDMNES permet aussi de comparer ces spectres simulés à des spectres expérimentaux à l'aide de critères objectifs.

Le logiciel utilise deux techniques de calcul monoélectroniques. La première repose sur la méthode des différences finies (MDF) pour résoudre l'équation de Schrödinger ce qui permet d'avoir une forme du potentiel tout à fait libre et en particulier non muffin-tin. La deuxième utilise le formalisme de Green (diffusion multiple) sur un potentiel muffin-tin. Elle est parfois moins précise mais beaucoup plus rapide. Le programme est symétrisé. Les opérations de symétrie sont calculées automatiquement.

Le premier chapitre contient les explications pratiques pour faire tourner le programme et en particulier la description des divers fichiers d'entrées. La section suivante est un cours sur l'absorption X

Le programme FDMNES peut être librement téléchargé à l'adresse WEB :

<http://www.neel.cnrs.fr/fdmnes>

En cas de publications liées à l'utilisation du programme, merci de citer :

Y. Joly

"X-ray absorption near edge structure calculations beyond the muffin-tin approximation"  
Phys. Rev. B **63**, 125120 (2001).

La mise au point du programme FDMNES a bénéficié en premier lieu de l'apport scientifique de Calogero Natoli qui a fourni une aide constante et essentielle. Il est en particulier à l'origine de tous les développements utilisant la théorie de la diffusion multiple, les extensions vers la diffraction résonante et le magnétisme. Le programme a également profité de l'expertise de Delphine Cabaret, Hubert Renevier, Sergio Di Matteo, Christian Brouder et Emilio Lorenzo sans lesquelles différentes avancées n'auraient pas pu être faites. Enfin, ce travail a été grandement facilité par l'appui de Denis Raoux.



# Faire tourner le programme

A) Présentation générale	7
B) Fichier d'entrée principal	11
C) Convolution	43
D) Optimisation des paramètres	49
E) Fichier nesparam.inc	53
F) Fichiers de densités électroniques atomiques	55
Liste des mots clefs de <i>fdmnes</i>	57



## A- Présentation générale

### I- Configuration informatique

FDMNES fonctionne sur tous les ordinateurs ayant au moins 256 Mo de mémoire vive, sous LINUX ou Windows. Il est distribué en clair, le langage de programmation étant fortran 90. Il nécessite la bibliothèque LAPACK librement distribuée sur le WEB. Il n'utilise pas de sortie graphique. L'utilisateur doit disposer d'un compilateur fortran 90. En cas d'utilisation sous Windows XP, un exécutable est aussi fourni.

### II- Les sources

Le module téléchargeable contient plusieurs ensembles: le programme *fdmnes* lui-même et un ensemble d'exemples de fichiers d'entrées et sorties.

- *fdmnes.exe* est le programme directement exécutable sous Windows XP
- *fdmfile.txt* est un fichier d'entrée,
- *xsect.dat* et *spacegroup.txt* sont des données nécessaires au programme,
- *prog* est un répertoire contenant les routines fortrains (*main.f*, *general.f*,...), le fichier "*nesparam.inc*" qui contient les dimensions de certains tableaux et le fichier "*mpif.h*".
- *entree* and *xanout* sont des répertoires qui contiennent une série d'exemples de fichiers d'entrée et de sortie de *fdmnes*.

### III- Différences avec les versions précédentes

Dans les versions antérieures à 2005, les calculs étaient nécessairement effectués en deux étapes, d'abord le calcul principal, puis la convolution. Deux différents programmes devaient tourner. Maintenant ces deux étapes peuvent être effectuées ensembles avec le seul programme *fdmnes*. Néanmoins l'utilisateur peut toujours séparer les deux phases comme précédemment, comme il est expliqué dans le chapitre décrivant le fichier d'entrée principal. Pour la partie convolution, les valeurs données pour l'élargissement sont maintenant les largeurs des niveaux et non plus les demi-largeurs.

Différentes améliorations ont aussi été apportées. Le programme peut fournir les différents tenseurs de diffusions aussi bien en base cartésienne que sphérique. Il est maintenant possible de comparer les spectres calculés à des spectres expérimentaux et d'effectuer les calculs sur différentes grilles de paramètres de façon à les optimiser.

Certains détails ont aussi changé. L'ancien fichier "*indata.gen*" est maintenant appelé "*fdmfile.txt*". Dans le fichier d'entrée principal, après les mots clefs "*range*" ou "*gamme*", il n'est plus nécessaire de préciser le nombre d'énergie, la première ligne n'est plus réservé à un commentaire et enfin le caractère "/" fait que ce qui suit dans la ligne n'est pas lu.

En octobre 2005, pour le RXS a été ajoutée la diffusion magnétique non résonante.

En octobre 2006, différents bugs ont été corrigés. La self-absorption en cas de calcul en diffraction résonante est maintenant calculé. Le fit de paramètres par comparaison avec des spectres expérimentaux est maintenant relativement au point.

En mai 2007, la symétrisation du programme a été améliorée. Elle prend en compte les atomes comportant une configuration non sphérique. Les moments magnétiques peuvent

maintenant ne plus être nécessairement colinéaires. La description de la base locale atomique est modifiée (voir mot clef "*crystal*"). En cas d'axe 3, dans le mode de calcul différences finies les calculs sont maintenant plus rapides.

En mars 2008, la symétrisation du programme en mode diffusion multiple sans spinorbite est en grande partie programmée. Le programme contient aussi un nouveau module permettant de générer des fichiers de sortie sélectionnant des spectres ou des dépendances azimutales à une certaine énergie à partir du fichier « scan » sortie de la convolution.

En février 2009, le calcul auto-cohérent est mis en place. Par défaut, le calcul de l'énergie de Fermi est effectué.

## IV- Compilation

Tous les programmes et sous-programmes fortran doivent être compilés et liés en ayant "*nesparam.inc*" et "*mpif.h*" dans le même répertoire puisque ces fichiers sont appelés lors de la compilation. La routine "*sub\_util.f*" contient une série de sous-programme de Lapack et Blas. Il peut être utile de remplacer ces routines par l'appel à ces bibliothèques. A l'exécution, le programme vérifie les dimensions de tous les tableaux. Pour la plupart des usages, les dimensions déclarées dans "*nesparam.inc*" sont suffisantes. Néanmoins en cas de dépassement, un message d'erreur est affiché donnant le nom de la dimension à augmenter dans "*nesparam.inc*". Après l'avoir modifiée, il faut recompiler.

En cas de calcul sur le cray, avant de compiler, il faut :

- modifier l'appel aux routines de lapack qui ont un nom différent (zgetrf, zsytrf, zgetri, zsytri dans la routine *invcomp* qui est dans le fichier *mat.f*),
- modifier dans la procédure *timesec* qui est dans le fichier *main.f*, l'appel au temps en substituant les 2 lignes d'instruction :

```
tps4 = secnds(0._4)
tps = dble(tps4)
```

par la seule ligne:

```
tps = second()
```

## V- Parallélisation

Grâce à Keisuke Hatada, Kuniko Hayakawa et Rainer Wilcke, les utilisateurs ayant accès à un cluster d'ordinateurs peuvent, en utilisant la librairie MPI, faire tourner le programme en mode parallèle. Pour cela, il faut supprimer les fichiers "*mpif.h*" et "*not\_mpi.f*" lors de la compilation et les substituer par l'appel à la bibliothèque.

## VI- Exécution

Une fois compilé, il suffit d'exécuter le programme selon la procédure valable sur votre système. Les fichiers "*xsect.dat*" et "*spacegroup.txt*" sont ouverts par le programme dans certains cas. Ils doivent être placés dans le même répertoire que l'exécutable.

Dès que le programme est lancé, il appelle le fichier "*fdmfile.txt*". Ce fichier doit être impérativement dans le même répertoire que l'exécutable. Il ne contient que le nombre de calculs indépendant à effectuer suivit du nom du fichier d'entrée de chacun de ces calculs. Par exemple :



*! Indata file for fdmnes*

*1*

→ nombre de fichiers d'entrée

*example/cu/cu\_inp.txt*

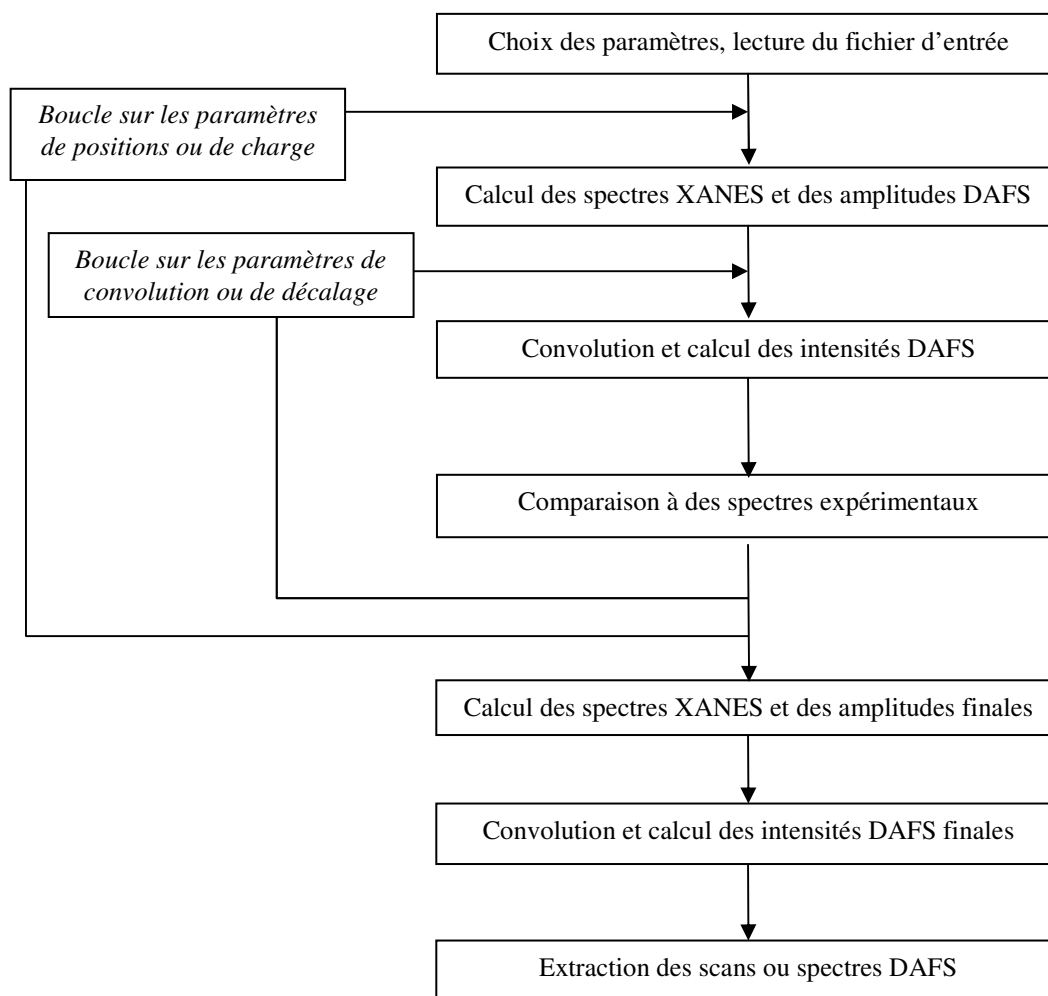
→ nom du fichier d'entrée

En cas d'erreur à l'exécution, un fichier appelé "*fdmnes\_error.txt*" est en principe créé. Ce fichier contient un message expliquant l'erreur rencontrée. Si l'arrêt se produit dès que le programme est lancé il faut d'abord vérifier plusieurs points:

- 1) Les fichiers appelés sont dans les bons répertoires.
- 2) Leurs noms sont corrects (sous linux, il faut respecter minuscules et majuscules).
- 3) Certains problèmes peuvent survenir lors d'utilisation de fichiers d'entrée téléchargés à cause d'incompatibilité entre systèmes. En cas de difficulté, on conseille de les réécrire complètement.
- 4) Il faut éviter les tabulations.

## **VII- Structure générale du calcul**

Le programme permet de calculer des spectres à partir d'une grille de paramètre (position, charge...), de les convoluer avec d'autres paramètres (largeur de convolution, décalage en énergie...), puis de les comparer à des spectres expérimentaux à l'aide de critères objectifs. On peut donc tenter d'optimiser certains des paramètres. Ces différentes étapes peuvent être faites ensembles ou séparément. Pour un calcul complet on aura l'organigramme suivant:



Cependant, on peut effectuer les différentes étapes de façon indépendante. La comparaison avec les spectres expérimentaux n'est pas non plus indispensable, d'ailleurs l'optimisation des paramètres quand elle est employée est à utiliser avec prudence. Dans la pratique de nombreux calculs se limitent aux étapes "Calcul des spectres XANES et des amplitudes" et "Convolution et calcul des intensités DAFS". Ces deux étapes peuvent aussi être faites ensembles ou séparément.

Le chapitre suivant traite du fichier d'entrée principal pour l'étape "Calcul des spectres XANES et des amplitudes". Généralement ce fichier est suffisant pour décrire toutes les données nécessaires au calcul car le programme génère lui-même les densités électroniques atomiques et le potentiel qui en découle. Cependant les utilisateurs peuvent préférer utiliser leurs propres bases atomiques. L'utilisateur peut aussi utiliser directement le potentiel calculé par le programme de structure de bande FLAPW WIEN-2k. Dans ces deux cas un certain nombre de fichiers d'entrée supplémentaires sont aussi à fournir. Le format de ces fichiers est décrit plus loin dans le manuel. Les entrées nécessaires aux étapes "Convolution", "Comparaison à des spectres expérimentaux" et "Extraction des scans ou spectres DAFS", bien qu'elles peuvent être mise dans le même fichier d'entrée, sont vues dans les chapitres C, D et E.

## B- Fichier d'entrée principal

### I- Structure générale

Il contient la plupart des entrées nécessaires au calcul. Toutes les données en entrée (et en sortie) sont en Angström et en électron-Volt. De nombreux paramètres sont choisis par défaut. On peut les modifier à l'aide de mots clefs. Le texte peut être en majuscules ou minuscules. Les lignes blanches ou commençant par un ! ne sont pas prises en compte. Entre les nombres sur une même ligne, il faut mettre au moins un caractère blanc. Les tabulations sont interdites. En cas de problème à l'ouverture de ces fichiers, il faut avant tout vérifier que leur nom est correct. De plus certains compilateurs n'apprécient pas de lire des fichiers écrits sous un autre système (MAC, DOS, LINUX...). En cas de difficulté du programme quand il veut ouvrir un de ces fichiers quand il a été téléchargé, il peut être judicieux de le réécrire.

Le fichier d'entrée est constitué d'un ensemble de blocs de données tous précédés d'un mot clef. La fin du fichier d'entrée est repérée par le mot clef "*end*" ou "*fin*". Tout ce qui serait après n'est pas lu. Voici un exemple de fichier d'entrée :

*! Fdmnes indata file*

*! Calculation for the copper K-edge in copper cfc*

*Filout*

*example/cu/cu\_out*

→ Nom des fichiers de sortie (sans extension)

*Range*

*-10. 0.2 0. 0.5 10. 1. 40.*

*Radius*

*3.0*

→ Rayon de l'agrégat

*Crystal*

*3.610 3.610 3.610 90. 90. 90.*

*29 0.0 0.0 0.0*

*29 0.5 0.5 0.0*

*29 0.5 0.0 0.5*

*29 0.0 0.5 0.5*

→ Structure du cristal

→ Paramètres de maille (Å et degrés) : a, b, c,  $\alpha$ ,  $\beta$ ,  $\gamma$

→ Numéro atomique, position

*Convolution*

→ Pour obtenir un spectre convolué.

*Efermi*

*-6.*

*End*

→ Fin du fichier d'entrée

Deux blocs de données sont indispensables à tout calcul. Le premier est précédé du mot clef "*radius*" (ou "*rayon*") sous lequel est défini le rayon de l'agrégat à l'intérieur duquel sera effectué le calcul. Le deuxième sert à décrire la structure du matériau. Si celui-ci est récupéré de la sortie du programme WIEN-2k, il est alors précédé du mot clef "*flapw*". Dans

le cas contraire, la structure de la molécule, ou de la maille élémentaire dans le cas d'un réseau 3D, est décrite dans le fichier. Cette description est précédée respectivement des mots clefs "*molecule*" et "*crystal*" (ou "*cristal*").

Tous les mots clefs liés à la convolution et à l'optimisation des paramètres sont traités dans les chapitres C et D.

## Nom des fichiers de sorties

Par défaut le nom des fichiers de sortie est *fdmnes\_out*. Ce nom peut être modifié par l'utilisation du mot clef "*filout*" suivi du nom que l'on désire (sans extension). Il y aura plusieurs fichiers de sortie en rajoutant au nom les extensions :

\_bav.txt        fichier bavard donnant des détails sur le calcul  
 .txt            fichier contenant les spectres calculés en colonnes

Dans le cas où il y a plusieurs seuils calculés en même temps, les résultats sont en fait répartis dans autant de fichiers. Par exemple pour un calculs sur les seuils L2 et L3, on aura les fichiers de sorties avec les extensions:

\_L2.txt et \_L3.txt

De même si on fait un calcul sur plusieurs sites cristallographiques, on aura les extensions :

\_i.txt, \_j.txt ... où i et j sont les indices des sites (voir mot clef *absorber*)

De façon optionnelle ou suivant le type de calcul on pourra aussi avoir les fichiers :

\_conv.txt        spectres convolués (mot clef *Convolution*)  
 \_scan.txt        dafs en fonction de la polarisation du photon pour les scans azimutaux.  
                   (mot clef *rxs*)  
 \_sda.txt        densité d'état de l'atome numéro a. a=0 désigne l'absorbeur (mot clef  
                   *density*)  
 \_atoma.txt       spectres pour l'atome a (mot clef *allsite*)  
 \_atoma\_scan.txt   rxs scan pour l'atome a (mots clefs *allsite* et *rxs*)

Pour l'analyse des tenseurs sphériques (mots clefs *spherical* et *sphere\_all*):

\_sph\_atoma.txt    tenseurs sphériques de l'atome a.  
 \_sph\_atoma\_int.txt intégrale des tenseurs sphériques de l'atome a.  
 \_sph\_signal\_atoma\_xan.txt contribution de chaque tenseur sphérique de l'atome au  
                   signal xanes moyen.  
 \_sph\_signal\_atoma\_poli.txt contribution de chaque tenseur sphérique de l'atome au  
                   signal xanes de la polarisation numéro i.  
 \_sph\_signal\_atoma\_rxsi.txt contribution de chaque tenseur sphérique de l'atome au  
                   signal rxs de la réflexion numéro i.  
 \_sph\_signal\_xtal\_xan.txt contribution de chaque tenseur sphérique du cristal au  
                   signal xanes.  
 \_sph\_signal\_xtal\_rxsi.txt contribution de chaque tenseur sphérique du cristal au  
                   signal rxs de la polarisation i.  
 \_sph\_xtal.txt     tenseurs sphériques du cristal  
 \_sph\_xtal\_int.txt intégrale des tenseurs sphériques du cristal  
 \_sph\_xtal\_rxsi.txt tenseurs sphériques du cristal pour la réflexion rxs numéro i

Pour l'analyse des tenseurs cartésiens (mot clef *cartesian*):

\_car\_atoma.txt    tenseurs cartésiens de l'atome a.

_car_xtal.txt	tenseurs cartésiens du cristal
_car_xtal_rxsi.txt	tenseurs cartésiens du cristal pour la réflexion rxs i.

## II- Mots clefs de base

### II-1) Rayon de l'agrégat

Les états finaux sont calculés à l'intérieur d'une sphère dont on définit le rayon par le mot clef "*radius*" (ou "*rayon*"). Seuls les atomes qui sont à l'intérieur de cette sphère sont considérés.

**Radius** → mot clef obligatoire précédant la valeur du rayon de l'agrégat.  
 3.5 → valeur en Angström du rayon de l'agrégat.

### II-2) Structure de l'agrégat ou du cristal

Sous "*crystal*" ou "*molecule*" se trouve toutes les données décrivant respectivement la maille unitaire ou la molécule. Si le calcul utilise le potentiel et les densités électroniques venant de flapw, ce bloc de données est inutile car la structure est lue dans un des fichiers de sortie de flapw. Sous le mot clef, viennent d'abord les paramètres de maille (Å) et les angles (degrés) de la maille ou du repère, puis pour tous les atomes de la maille (et pas seulement les inéquivalents, sauf dans le cas où on précise le groupe d'espace avec le mot clef "*spgroup*"), le numéro atomique et la position en unité de maille. Par défaut et en l'absence du mots clef "*absorber*", l'espèce chimique qui absorbe est celle correspondant au premier atome de la liste.

Exemple 1. Maille du cuivre cfc cristallin :

<b>Crystal</b>							→ Structure du cristal (ou " <i>crystal</i> ")
	3.610	3.610	3.610	90.	90.	90.	→ a, b, c, α, β, γ
29	0.0	0.0	0.0				→ Numéro atomique, position
29	0.5	0.5	0.0				
29	0.5	0.0	0.5				
29	0.0	0.5	0.5				

Exemple 2. Calcul d'un octaèdre FeO<sub>6</sub> :

<b>Molecule</b>							
	1.900	1.900	1.900	90.	90.	90.	→ a, b, c, α, β, γ
26	0.0	0.0	0.0				→ Numéro atomique, position
8	1.0	0.0	0.0				
8	-1.0	0.0	0.0				
8	0.0	1.0	0.0				
8	0.0	-1.0	0.0				
8	0.0	0.0	1.0				
8	0.0	0.0	-1.0				

Les structures atomiques peuvent aussi être données en coordonnées sphériques ou cylindriques. Pour utiliser des coordonnées cylindrique, il suffit de n'écrire que deux nombres dans la ligne qui suit "*molecule*". Le programme comprend alors qu'il s'agit de *a* et *c* et que

les positions des atomes qui suivent sont données par  $r$ ,  $\theta$  et  $z$ . Donc, pour décrire le même octaèdre qu'au dessus :

**Molecule**

	1.900	1.900		→ a, c
26	0.0	0.0	0.0	→ Atomic number, position
8	1.0	0.0	0.0	
8	1.0	180.0	0.0	
8	1.0	90.0	0.0	
8	1.0	-90.0	0.0	
8	0.0	0.0	1.0	
8	0.0	0.0	-1.0	

Pour utiliser les coordonnées sphériques, seulement un nombre ( $a$ ) doit être mis après "*molecule*". La position des atomes est alors donnée par  $r$ ,  $\theta$ ,  $\phi$ . Pour le même octaèdre :

**Molecule**

	1.900			→ a
26	0.0	0.0	0.0	→ Atomic number, position
8	1.0	90.0	0.0	
8	1.0	90.0	90.0	
8	1.0	90.0	180.0	
8	1.0	90.0	270.0	
8	1.0	0.0	0.0	
8	1.0	180.0	0.0	

Il est possible, dans les cas non magnétiques, de ne spécifier que les atomes non-équivalents, dans ce cas, il faut obligatoirement donner le groupe d'espace à l'aide du mot clef "*Spgroup*". Il faut donner le nom complet comme décrit dans les tables internationales. Par exemple pour la magnétite, on aura :

**Spgroup**

*Fd-3m:1* → on peut aussi écrire 227:1

**Crystal**

8.3940 8.3940 8.3940 90.0 90.0 90.0

26 .6250 .6250 .6250 ! Fe 16d

26 .0000 .0000 .0000 ! Fe 8a

8 .3800 .3800 .3800 ! O 32<sup>e</sup>

Noter que pour le calcul des symétries il est important que la position des atomes soit définie avec suffisamment de chiffres significatifs (mettons 10). Par exemple pour le graphite, il faudra écrire :

**Spgroup**

*P63mc*

**Crystal**

2.456 2.456 6.696 90. 90. 120. = a, b, c, alpha, beta, gamma

```
6 0.0 0.0 0.0
6 0.3333333333 0.6666666667 0.0
```

Mettre en dernière ligne par exemple 0.3333 entraînerait la création de d'atomes fictifs très proches. Le programme s'arrêterait alors avec un message d'erreur.

### II-3) Densités électroniques atomiques

Une configuration électronique est utilisée par défaut pour tous les atomes. Il est possible de la modifier par l'utilisation du mot clef "*atom*". Dans ce cas, sous "*crystal*" ou "*molecule*" il ne faut plus mettre le numéro atomique mais le numéro de type d'atome. Par exemple dans le cas d'un octaèdre FeO<sub>6</sub> avec la configuration Fe 3d<sup>6</sup>4s<sup>2</sup> et O 2s<sup>2</sup>2p<sup>4</sup> :

**Atom** → mot clef précédant les données atomiques  
 26 2 3 2 6. 4 0 2. → numéro atomique de l'espèce chimique de type 1, nombre  
 8 2 2 0 2. 2 1 4. d'orbitales de valence et (n,l,pop) de chaque orbitale de valence

**Molecule**  
 1.900 1.900 1.900 90. 90. 90. → a, b, c, α, β, γ  
 1 0.0 0.0 0.0 → Type atomique, position  
 2 1.0 0.0 0.0  
 2 -1.0 0.0 0.0.  
 2 0.0 1.0 0.0  
 2 0.0 -1.0 0.0  
 2 0.0 0.0 1.0.  
 2 0.0 0.0 -1.0

Remarque importante : contrairement à ce que l'on peut penser les charges formelles que l'on affecte aux atomes pour les composés ioniques sont loin de la réalité. On conseille donc d'effectuer des échanges de charges entre atomes avec modération. Une bonne technique pour commencer consiste à mettre le bon nombre d'électrons « d » selon la charge formelle, mais de conserver l'atome neutre en peuplant des orbitales externes, à grand rayon type 4s ou 4p pour un métal de transition.

### II-4) Absorbeurs

Tous les atomes présents dans la structure participent à la diffusion. Par défaut, les spectres calculés correspondent à la somme des diffusions produites par les atomes de même numéro atomique que le premier atome de la liste sous "*crystal*" ou "*molecule*".

Quand on utilise le mot clef "*extract*" ou quand on veut sélectionner certains des atomes, il faut utiliser le mot "*absorber*". Par exemple, si l'atome absorbeur doit être le nième de la liste (sous "*crystal*" ou "*molecule*") mettre :

**Absorber**  
 3 → numéro de l'absorbeur (ici le 3<sup>ème</sup> atome de la liste).

Si cet exemple va avec la structure FeO<sub>6</sub> définie juste au dessus, le résultat dans le fichier de sortie correspondrait au calcul de l'oxygène sommé sur les 6 atomes puisqu'ils sont



équivalents par symétrie. Si on veut le résultat d'un seul site, il faut utiliser soit le mot clef "symsite" soit "allsite" (voir plus loin).

On peut calculer plusieurs sites non équivalents en spécifiant tous les numéros d'atome sous "absorber". Le nom de chacun des fichiers de sortie correspondant aura le suffixe "\_n" où  $n$  est le numéro de l'atome dans le fichier d'entrée.

### **Filout**

*Copper\_out*

### **Absorber**

1 5 → numéro des atomes dont les résultats seront stockés dans les fichiers de sorties  
copper\_out\_1 et copper\_out\_5

La somme sur ces différents sites ainsi que l'éventuel décalage relatif en énergie est à effectuer durant une étape ultérieure.

## **II-5) Gamme d'énergie**

La gamme d'énergie que l'on définit en entrée est l'énergie  $E$  des photoélectrons par rapport au niveau de Fermi supposé. L'énergie cinétique,  $E_c$ , des photoélectrons quand ils sortent de l'agrégat doit être positive.  $E_c$  est donné en fonction de l'énergie en entrée par :

$$E_c = E - W - V_m,$$

où  $W$  est le travail de sortie et  $V_m$  le potentiel moyen (équivalent du fond muffin-tin) dans l'agrégat.

Dans le cas d'un calcul utilisant les sorties flapw, la partie coulombienne du potentiel moyen  $V_m$  est nulle.  $V_m$  est donc plus grand, voir supérieur à zéro. Le travail de sortie n'est donc pas soustrait et l'énergie définie en entrée est par rapport au vide.

Par défaut la gamme en énergie est de -5 à 60 eV par pas de 0.5 eV. On peut changer la gamme, le pas et même avoir un pas variable avec :

**Range** → mot clef décrivant la gamme en énergie (ou "gamme")

-1. 0.5 60. →  $E_{\min}$ , pas,  $E_{\max}$

Autre exemple avec pas variable :

### **Range**

-1. 0.1 10. 0.5 20. 1. 60.00 →  $E_{\min}$ , pas,  $E$  intermédiaire, pas, ...

Pour avoir un pas continûment variable (pas en  $k$  constant) mettre :

### **Rangel**

-1. 0.1 200. →  $E_{\min}$ , pas au niveau de Fermi,  $E_{\max}$

Par défaut, les amplitudes et sections efficaces en sortie sont référencées par rapport au niveau de Fermi. Si on veut que l'échelle d'énergie soit celle du photon, mettre le mot clef :

### **Energpho**

## II-6) Mode diffusion multiple

Par défaut, le calcul est en différences finies. Si on veut fonctionner en diffusion multiple utiliser le mot clef :

### *Green*

Le potentiel est alors automatiquement de type muffin-tin. Noter que ce mode de calcul est beaucoup plus rapide et qu'il faut donc le privilégier.

## II-7) Type de Seuil

Par défaut le seuil est de type K. Dans le cas contraire introduire :

*Edge* → mot clef précédant le type de seuil (ou “*seuil*”)  
*L1* → seuil (K, L1, L2, L3, M1 ... )

On peut faire dans un même calcul 2 seuils, de même (n,l) initial, c'est à dire les seuils L2 et L3 ou M2 et M3 ou M4 et M5 ... Dans ce cas écrire :

*Edge*  
*L23* → seuils L2 et L3, ou M23, M45, N23, N45.

Dans ce cas, on a alors deux fichiers de sorties avec les suffixes \_L2 et \_L3.

## II-8) Développement multipolaire

Par défaut, seule la composante dipolaire est calculée. Ceci est modifié par les mots clefs :

*Quadrupole* → calcul quadrupolaire  
*Octupole* → calcul octupolaire  
*Nondipole* → ne calcule pas la composante dipolaire-dipolaire  
*Nonquadrupole* → ne calcule pas la composante quadrupolaire-quadrupolaire  
*Noninterf* → ne calcule pas la composante d'interférence dipole-quadrupole  
*Nonoctupole* → ne calcule pas la composante d'interférence dipole-octupole

## II-9) Polarisation et dichroïsme

Par défaut le calcul est effectué selon 1, 2 ou 3 polarisations orthogonales en dipolaires (et jusqu'à six en quadrupolaires) suivant la symétrie. Les différentes polarisations étant choisies selon les axes d'une base interne au programme. Le résultat n'est donné que pour leur moyenne, (correspondant à un calcul sur poudre) dans les fichiers de sorties. Si on veut avoir le XANES suivant des orientations particulières de la polarisation et du vecteur d'onde (en quadrupolaire) ou si on veut faire du dichroïsme circulaire, il faut introduire le mot clef :

### *Polarize*

Ainsi écrit, on aura en sortie toutes les polarisations, puis la moyenne en dernière colonne. Si on veut des polarisations particulières, il faut les écrire en dessous du mot clef :

***Polarize***

```
1.0 1.0 0.0
1.0 -1.0 0.0
0.0 0.0 1.0
```

Pour un calcul quadripolaire, il faut aussi spécifier le vecteur d'onde :

***Polarize***

```
1.0 1.0 0.0 0.0 0.0 1.0
1.0 -1.0 0.0 0.0 0.0 1.0
0.0 0.0 1.0 0.0 0.0 0.0
```

Chaque ligne contient le vecteur polarisation, le vecteur d'onde. Si le vecteur d'onde est nul, cette polarisation est calculée en dipolaire.

Il est possible de faire la moyenne de différentes polarisations en ajoutant un nombre à la fin de la ligne correspondante qui sera le poids. Si au moins deux des poids sont non nuls, en sortie, on aura une colonne contenant la moyenne pondérée des diverses polarisations. Le poids peut être omis, il est alors considéré comme nul.

***Polarize***

```
1.0 1.0 0.0 0.0 0.0 1.0 1.
1.0 -1.0 0.0 0.0 0.0 1.0 1.
0.0 0.0 1.0 0.0 0.0 0.0 0.
```

Si on veut avoir une polarisation circulaire, il suffit de mettre celle-ci nulle en entrée, suivi du vecteur d'onde:

***Polarize***

```
0.0 0.0 0.0 0.0 0.0 1.0
```

En sortie on aura les calculs en polarisation circulaire droite, puis circulaire gauche puis la différence. Dans cet exemple, les calculs correspondront aux polarisations  $x+iy$  et  $x-iy$ .

**II-10) Diffraction anormale ou résonante**

Si on veut faire un calcul de diffraction anormale (ou résonante) (DAFS, DANES, RXS), il faut introduire le mot clef "*dafs*" (ou "*rxs*") suivi des indices des faisceaux à calculer. L'orientation des vecteurs polarisations et d'onde peut être décrite de plusieurs façons. Si on est en polarisation  $\sigma$ - $\sigma$ ,  $\sigma$ - $\pi$ ,  $\pi$ - $\pi$  ou  $\pi$ - $\sigma$ , ou circulaire on peut mettre les indices 1, 2, 3, 4 ou 5 pour les polarisations respectivement  $\sigma$ ,  $\pi$ , circulaire droite, circulaire gauche ou rectiligne dans une direction quelconque, en entrée puis en sortie. Ensuite on met l'angle azimutal que forme le plan d'incidence avec un repère ( $I, J, Q$ ) défini en dessous :

***Dafs***

0 0 2 1 2 45. → indices de la réflexion,  $\sigma$ ,  $\pi$ , azimuth

0 0 2 1 1 45. → indices de la réflexion,  $\sigma$ ,  $\sigma$ , azimuth

Dans le cas d'une polarisation rectiligne, ni  $\sigma$ , ni  $\pi$ , mais avec un angle  $\alpha$ , tel que  $\alpha = 0$  quand la polarisation est  $\sigma$  et 90 quand la polarisation est  $\pi$ , il faut écrire :

**Dafs**

0 0 2 1 0. 5 10. 45. → indices de la réflexion, sigma, angle, rectiligne, angle, azimuth

0 0 2 1 0. 5 -10 45.

Noter qu'il faut dans ce cas spécifier les 2 angles en entrée et en sortie, même si l'une des 2 est  $\sigma$ ,  $\pi$ , ou circulaire. Quand elle est circulaire, l'angle écrit ne sera pas pris en compte.

Le repère  $(I, J, Q)$  est tel que :

$Q$  est le vecteur diffraction normalisé,

$$\vec{I} = \vec{Q} \wedge \frac{\vec{k} \wedge \vec{Q}}{|\vec{k} \wedge \vec{Q}|}$$

$$\vec{J} = \vec{Q} \wedge \vec{I}$$

sauf si  $Q$  est selon Oz, dans ce cas  $\vec{k}$  est substitué par  $\vec{i}$ .  $\vec{k} = \frac{\vec{c}}{c}$  et  $\vec{i} = \frac{\vec{a}}{a}$  sont les vecteurs de

bases de la maille élémentaire du réseau direct. On a alors en fonction de l'angle de Bragg  $\beta$  et de l'angle azimuthal  $\varphi$  les vecteurs d'onde entrant et sortant :

$$\vec{v}_e = \cos\beta \cos\varphi \vec{I} - \cos\beta \sin\varphi \vec{J} - \sin\beta \vec{Q},$$

$$\vec{v}_s = \cos\beta \cos\varphi \vec{I} - \cos\beta \sin\varphi \vec{J} + \sin\beta \vec{Q}.$$

Pour les polarisations  $\sigma$  et  $\pi$  on a :

$$\vec{e}_\sigma = \sin\varphi \vec{I} + \cos\varphi \vec{J}$$

$$\vec{e}_{\pi e} = \vec{v}_e \wedge \vec{e}_\sigma = \sin\beta \cos\varphi \vec{I} - \sin\beta \sin\varphi \vec{J} + \cos\beta \vec{Q}$$

$$\vec{e}_{\pi s} = \vec{v}_s \wedge \vec{e}_\sigma = -\sin\beta \cos\varphi \vec{I} + \sin\beta \sin\varphi \vec{J} + \cos\beta \vec{Q}$$

Par exemple : maille orthogonale, raie (h,0,0),  $(\vec{I}, \vec{J}, \vec{Q}) = (\vec{k}, -\vec{j}, \vec{i})$

1 1 0. → correspond à  $\sigma$ - $\sigma$  avec polarisation selon  $-\vec{j}$ .

1 1 90. → correspond à  $\sigma$ - $\sigma$  avec polarisation selon  $\vec{k}$ .

maille orthogonale, raie (0,0,1),  $(\vec{I}, \vec{J}, \vec{Q}) = (\vec{i}, \vec{j}, \vec{k})$

1 1 0. → correspond à  $\sigma$ - $\sigma$  avec polarisation selon  $\vec{j}$ .

1 1 90. → correspond à  $\sigma$ - $\sigma$  avec polarisation selon  $\vec{i}$ .

Si on ne met pas l'angle, cela implique que l'on fait un scan en phi et toutes les amplitudes sont calculées pour tous les angles par pas de 2°. On a alors un fichier de sortie supplémentaire avec le suffixe "\_scan.txt".

Il est aussi possible d'effectuer un scan de 360° par pas de 2° pour les polarisations rectilignes incidente ou sortantes. Pour cela, il faut écrire le chiffre 10 à la place de l'indication de sigma-pi :

**Dafs**

0 0 2 10 1 45. → polarisation entrante scannée

0 0 2 2 10 45. → polarisation sortante scannée

La première valeur (angle = 0°) correspond à la polarisation  $\sigma$ . 90° correspond à la polarisation  $\pi$ .

Il est aussi possible d'indiquer explicitement les directions de polarisation. Ceci peut être utile pour des utilisations particulières comme en photoémission. En cas de polarisation rectiligne on écrit alors :

### ***Dafs***

0 0 0 → indice réflexion

0. 0. 1. 0. 1. 0 →  $\epsilon_e, v_e$

0. 0. 1. 0.7071 0.7071 0. →  $\epsilon_s, v_s$

En cas de polarisation circulaire, elle est maintenant complexe :

### ***Dafs***

0 0 0 → indice réflexion

0.7071 0.7071 0. 0. 0. 0. 0. 1. 0. →  $\epsilon_e, v_e$  ( $\epsilon_{xr} \epsilon_{xi} \epsilon_{yr} \epsilon_{yi} \epsilon_{zr} \epsilon_{zi} v_{ex} v_{ey} v_{ez}$ )

0.7071 -0.7071 0. 0. 0. 0. 0. 1. 0. →  $\epsilon_s, v_s$

Dans le cas où on ne veut pas de terme de phase entre atome, par exemple pour simuler de la photoémission, il suffit de mettre 0 0 0 comme indice de réflexion.

Il est possible de choisir n'importe quelle origine pour l'azimut. Pour cela il suffit de choisir un autre vecteur que  $\vec{k}$  (ou  $\vec{i}$ ) pour définir les vecteurs de base  $\vec{I}$  et  $\vec{J}$ . Dans ce cas écrire :

### ***Zero\_azim***

0. 1. 1. → Vecteur dans la base du cristal

Il est possible de calculer l'absorption (ou self absorption) correspondant aux polarisations incidentes et sortantes pour chaque réflexions. Il suffit de mettre le mot clef :

### ***Self\_absorption***

On a alors dans les fichiers de sortie, après chaque réflexion, 2 colonnes supplémentaires contenant ces valeurs. L'unité comme pour les autres spectres XANES est le Mégabarn. Ils contiennent, après convolution, en plus de l'absorption correspondant à l'atome et au seuil calculé, l'absorption venant de autres atomes et des autres seuils. En d'autres termes, l'absorption avant seuil est non nulle. Ces données permettent de faire la correction d'absorption pour comparer aux spectres expérimentaux.

## **II-11) Calculs polarisés en spin**

Si on veut faire un calcul polarisé en spin, mettre le mot clef :

### ***Magnetism***

Par défaut le calcul est effectué en négligeant l'interaction spin-orbite. Si on veut tenir compte de cette dernière, mettre le mot clef :

### ***Spinorbite***

Le mot clef "*magnetism*" est alors inutile. Si les potentiels polarisés sont issus de flapw, "*spinorbite*" ou "*magnetism*" doit être avant le mot clef "*flapw*".

Avec l'interaction spin-orbite, le calcul est automatiquement relativiste, pour un calcul non relativiste mettre :

### ***Nonrelat***

Quand le calcul n'est pas de type flapw, l'utilisation du mot clef "*atom*" est alors indispensable pour définir une certaine configuration électronique différente pour les spins up et down. La population des orbitales doit être donnée pour chacun des spins en dédoublant les colonnes correspondantes.

Exemple du nickel métallique cfc :

### ***Magnetism***

#### ***Atom***

```
28 2 3 2 5.0 4.0 4 0 0.5 0.5
```

#### ***Crystal***

```
3.52387 3.52387 3.52387 90. 90. 90.
```

```
1 0.0 0.0 0.0
```

```
1 0.5 0.5 0.0
```

```
1 0.5 0.0 0.5
```

```
1 0.0 0.5 0.5
```

La configuration est  $3d^9 4s^1$  avec 5 électrons 3d up et 4 électrons 3d down, 0.5 électron 4s up et 0.5 électron 4s down.

Dans le cas d'une structure antiferromagnétique, il faut mettre un signal négatif devant le type des atomes ayant la polarisation en spin inverse. Exemple de  $V_2O_3$  monoclinique:

#### ***Atom***

```
23 3 3 2 2. 0. 4 0 1. 1. 4 1 0.5 0.5
```

```
8 2 2 0 1. 1. 2 1 2. 2.
```

#### ***Crystal***

```
7.255 5.002 5.548 90.0 96.75 90.0 / a, b, c, alfa, beta, gamma
```

```
1 0.34380 0.00080 0.29910 V8
```

```
1 0.65620 0.99920 0.70090 V6
```

```
1 0.84380 0.99920 0.29910 V3
```

```
1 0.15620 0.00080 0.70090 V7
```

```
-1 0.84380 0.50080 0.79910 V4
```

```
-1 0.15620 0.49920 0.20090 V5
```

```
-1 0.34380 0.49920 0.79910 V2
```

```

-1 0.65620 0.50080 0.20090 VI
2 0.40700 0.84500 0.65200 O 1 8f
2 0.09300 0.84500 0.34800 O 2 8f
2 0.59300 0.15500 0.34800 O 3 8f
2 0.90700 0.15500 0.65200 O 4 8f
2 0.90700 0.34500 0.15200 O 5 8f
2 0.59300 0.34500 0.84800 O 6 8f
2 0.09300 0.65500 0.84800 O 7 8f
2 0.40700 0.65500 0.15200 O 8 8f
2 0.25000 0.19100 0.00000 O 1 4e
2 0.75000 0.80900 0.00000 O 2 4e
2 0.75000 0.69100 0.50000 O 3 4e
2 0.25000 0.30900 0.50000 O 4 4e

```

## II-12) Calcul relativiste

**Relativism** → Mot clef pour faire un calcul relativiste

## II-13) Axe du spin

Par défaut l'axe des spins est selon la direction  $c$  du cristal ou  $z$  de la molécule sauf dans le cas d'un réseau trigonal où il est selon l'axe  $c$  de la maille hexagonale associée. Cet axe peut être orienté dans une direction quelconque (mais uniforme) :

### Axe\_spin

-0.08909 0. -0.15025 → défini en unité paramètre de maille

Une autre façon de spécifier cet axe est d'utiliser les angles d'Euler. Ceux-ci sont définis dans une base orthogonale telle que  $z$  est le long de  $c$  sauf en cas de symétrie trigonale où  $z$  est selon l'axe hexagonal.  $x$  est selon  $b \times c$  et  $y$  est selon  $z \times x$ . Il faut alors écrire :

### Ang\_spin

45. 90. 0. → rotation autour de  $z$ , puis autour de  $y$ , puis autour de  $x$ . Dans ce cas l'axe de spin est selon (1,1,0) dans la base interne.

Remarquer qu'il est possible de définir des spins non colinéaires en utilisant des bases atomiques locales définies par les angles d'Euler. Ceci est fait sous les mots clefs « crystal » ou « molecule » devant chaque atome. Regarder au paragraphe sur les atomes non sphériques. Exemple :

### Crystal

7.7400 7.7400 3.8400 90. 90. 90.

45. 90. ! spin axis along (1 1 0)

1 0.0 0.0 0.0

2 0.25 0.25 0.5

135. 90. ! spin axis along (-1 1 0)

1 0.5 0.0 0.0

2	0.75	0.25	0.5	
315.	90.			! spin axis along (-1 -1 0)
1	0.0	0.5	0.0	
2	0.25	0.75	0.5	
225.	90.			! spin axis along (1 -1 0)
1	0.5	0.5	0.0	
2	0.75	0.75	0.5	

## II-14) Calculs auto-cohérent

Par défaut, un cycle de calcul sur les états occupés est effectué pour déterminer le niveau de Fermi. Le calcul du XANES correspond au cycle 2, mais ce calcul reprend les potentiels initiaux. Pour éviter ce calcul du niveau de Fermi (non auto-cohérent), mettre le mot clef :

***No\_Fermi***

Pour effectuer un calcul auto-cohérent, mettre le mot clef :

***SCF***

Le calcul est alors réellement auto-cohérent. Le potentiel est recalculé à chaque itération. Le calcul final utilise le potentiel auto-cohérent. Par défaut la convolution utilisera comme énergie de coupure, le niveau de Fermi ainsi calculé.

En cas de calcul SCF, le rayon de l'agrégat pour l'auto-cohérence est le même que celui du XANES. Pour une simple évaluation de l'énergie de Fermi sans auto-cohérence, le rayon est pris comme étant le minimum entre 3.5 Å et le rayon du XANES. Dans les 2 cas, ce rayon peut être modifié par le mot-cle :

***R\_self***

3. → valeur du rayon de l'agrégat pour SCF et/ou calcul de l'énergie de Fermi.

En cas de calcul SCF, le nombre de cycle est au maximum de 30. Ce nombre peut être modifié par :

***N\_self***

20

Le cycle n+1 est pris par interpolation entre les deux cycles précédents. Le poids initial du cycle courant est par défaut de 0.1. Ce poids diminue ou augmente, entre cette valeur et son dixième, suivant la qualité de la convergence. Pour modifier ce poids initial, utiliser :

***P\_self***

0.05 → valeur du poids initial.

La convergence est considérée comme faite quand la variation de l'énergie total est inférieure à  $N_a \times \Delta E_{conv}$ , où  $N_a$  est le nombre d'atomes et  $\Delta E_{conv}$  un critère fixé par défaut à 1 eV. Pour modifier  $\Delta E_{conv}$  mettre :



***Delta\_E\_conv***

2. → Valeur de  $\Delta E_{\text{conv}}$ .

Par défaut, le calcul auto-cohérent est effectué sur un agrégat non excité, sauf pour les seuil  $L_{23}$  des 3d et  $M_{45}$  des 4f. Le potentiel de l'absorbeur excité du XANES n'est pris en compte par différence qu'à la dernière étape. Si on veut effectuer le calcul auto-cohérent avec un absorbeur excité, mettre le mot clef :

***SCF\_exc***

Si on veut imposer un absorbeur non excité mettre :

***SCF\_non\_exc*****II-14) Calculs de grosses molécules**

Par défaut le programme vérifie la symétrie de tous les atomes et le fait qu'ils ne soient pas trop proches les uns des autres. Pour éviter ces vérifications et gagner un peu d'espace mémoire, mettre le mot clef suivant, (de préférence avant les mots clef *cluster* ou *crystal* pour avoir aussi une lecture plus rapide):

***Biology***

### III- Mots clefs sophistiqués

#### III-1) Utilisation de densités électroniques atomiques venant de fichiers extérieurs

Si on utilise des densités provenant de fichiers externes, ceux-ci doivent être défini à l'aide du mot clef « *atom* ». Il faudra éventuellement définir un atome de plus. L'atome absorbeur est une espèce chimique spéciale différente des autres atomes non excités. Son fichier d'entrée correspondant doit aussi contenir l'orbitale de l'électron avant excitation (par exemple l'orbitale 1s pour un seuil K). Pour le format de ces fichiers voir le chapitre D. Dans le cas où on a 2 atomes :

<b>Atom</b>	→ mot clef précédant les données atomiques
Fe_exc.txt	→ nom du fichier contenant l'atome excité
Fe.txt	→ nom du fichier de l'atome de type 1
Oxygen.txt	→ nom du fichier de l'atome de type 2

On peut aussi avoir une composition mixte de fichiers extérieurs et de base interne :

<b>Atom</b>	
Fe_exc.txt	→ nom du fichier contenant l'atome excité
Fe.txt	→ nom du fichier de l'atome de type 1
8 2 2 0 2. 2 1 4.	→ atome de type 2 calculé par le programme lui-même

Une fois définis ces types d'atomes, la description de la molécule ou de la maille utilise le numéro de type d'atome et non pas le numéro atomique. Par exemple dans le cas du cuivre cfc cristallin :

<b>Atom</b>	
c:\users\joly\dirac\cu\trdrslcu.e01	→ fichier du cuivre excité
c:\users\joly\dirac\cu\trdrslcu.001	→ fichier des cuivres standards

<b>Crystal</b>		→ Structure du cristal
3.610 3.610 3.610 90. 90. 90.		→ a, b, c, $\alpha$ , $\beta$ , $\gamma$
1 0.0 0.0 0.0		→ Numéro de type atomique, position
1 0.5 0.5 0.0		
1 0.5 0.0 0.5		
1 0.0 0.5 0.5		

Le premier indice devient le numéro de type d'atome (mis à part l'excité) correspondant à son numéro d'ordre sous "*atom*".

#### III-2) Utilisation de densités électroniques atomiques de Clementi et Roetti

Par défaut, les densités électroniques atomiques sont calculées selon une procédure Hartree-Fock-Dirac. Si on préfère utiliser les bases de Clementi et Roetti il faut ajouter le mot clef :

**clementi**

### III-3) Densités électroniques atomiques non sphériques

En cas de calcul en différences finies, il est possible de définir des densités électroniques atomiques non sphériques. Ceci est fait sous les mots clefs "*cristal*" ou "*molecule*". Pour chaque atome non sphérique on effectue un développement en harmoniques sphériques des orbitales à peupler. En pratique, sur la ligne "type d'atome position", on ajoute un entier donnant le nombre d'orbitales non sphériques, puis lignes suivantes les développement en (l,m) de chacune de ces orbitales avec en dernier le nombre d'électron qu'elle contient. On peut définir une base atomique locale ayant subi une rotation par rapport à la base générale en utilisant les angles d'Euler (voir mot clef « *spin\_axis* » pour la définition des angles d'Euler. Ces angles sont alors mis dans la ligne juste avant l'atome. Exemple :

#### **Molecule**

1.900 1.900 1.900 90. 90. 90.	→ a, b, c, $\alpha$ , $\beta$ , $\gamma$
0. 45. 0.	→ rotation de 45° autour de Oy
1 0.0 0.0 0.0 1	→ il y a une orbitale non sphérique
0. 0. 0. 0. 0. 0. 1. 0. 0. 1.	→ (l,m) dans l'ordre naturel, ici (l=2,m=0) est peuplé de
2 1.0 0.0 0.0	1 électron
2 -1.0 0.0 0.0	
2 0.0 1.0 0.0	
2 0.0 -1.0 0.0	

Le programme ne tient pas compte de ces orbitales lors des calculs de symétrie. Il faut donc faire attention lorsqu'une telle orbitale réduit la symétrie du cristal ou de la molécule.

### III-4) Dilatation des orbitales

Il est possible de modifier les orbitales de valence des bases utilisées au dessus en les dilatant ou les contractant. Ceci peut être particulièrement utile pour les matériaux ioniques, par exemple pour l'oxygène chargé 2<sup>-</sup>, où les bases atomiques sont calculées pour des atomes neutre. Pour ça, il faut introduire le mot clef "*dilatorb*" puis pour chaque orbitale que l'on veut dilater, le type d'atome (numéro de la liste "*atom*"), le numéro de l'orbitale de valence et le coefficient d'expansion :

#### **Dilatorb**

```
3 1 0.3
3 2 0.3
```

### III-5) Ecrantage

Par défaut, l'écrantage est de 1 électron sur la première orbitale de valence non pleine de l'absorbeur. Si on veut modifier cette valeur ou le numéro de l'orbitale, mettre le mot clef "*ecrantage*" ou "*screening*" suivi des nombres quantiques n et l de l'orbitale de valence dans laquelle on va mettre cette charge et de sa valeur en nombre d'électron (de préférence inférieure à 1 !). Dans ce cas l'agrégat n'est plus obligatoirement neutre.

#### **Screening**

```
3 2 0.2
```

→ n et l de l'orbitale de valence et écrantage

### III-6) Charge de la maille ou de la molécule

La maille d'une cellule doit être neutre. Une molécule l'est également souvent. Un test est effectué dans le programme pour vérifier cette neutralité. Ce test peut être omis avec le mot clef :

***Chlibre***

### III-7) Potentiel d'échange-corrélation

Par défaut les calculs sont faits avec le potentiel d'échange-corrélation d'Hedin, Lundqvist et Von Barth réel. Si on veut utiliser l'approximation Xalpha, il faut introduire le mot clef *Xalpha* suivi de la valeur du paramètre correspondant :

***Xalpha***

0.3333

→ valeur du paramètre Xalpha

Dans le cas d'utilisation du potentiel d'échange-corrélation calculé par flapw, si on veut conserver ce potentiel indépendant de l'énergie mettre aussi le mot clef *xalpha* avec n'importe quelle valeur non nulle en dessous. Le potentiel ne sera pas Xalpha mais bien celui calculé par par flapw.

Si on préfère utiliser le potentiel de Perdew et Wang mettre le mot clef :

***Perdew***

Ce potentiel sera alors utilisé avec la paramétrisation de Moruzzi, Janak et Williams mais en conservant la dépendance en énergie d'Hedin et Lundqvist.

### III-8) Origine du vecteur d'onde électronique

Par défaut l'origine du vecteur d'onde (et donc de l'énergie cinétique à l'extérieur de la sphère du calcul et le fond muffin-tin en cas de calcul muffin-tin) est pris comme étant le potentiel moyen entre l'atome absorbeur et sa première couronne de voisin en cas de calcul en green et sur les point en bordure de la sphère extérieure en cas de calcul en différences finies. On peut imposer la valeur de ce potentiel calculée à l'énergie de Fermi. La dépendance fonction de l'énergie cinétique du photoélectron est alors rajouté à ce terme. Mettre alors le mot clef :

***V0imp***

-11.5

→ valeur du potentiel moyen au niveau de Fermi.

### III-9) Potentiel maximum

Pour un calcul effectué sur une molécule, le potentiel remonte vers zéro en s'éloignant des atomes. Si cette molécule n'est pas en phase gaz mais en solution ou dans un environnement relativement dense, cette remontée est artificielle. En cas de calcul en

différences finies ceci amène au calcul d'état faussement liés et donc très étroits en énergie. Il peut être judicieux de donner une valeur maximum à ce potentiel pour éviter ce phénomène par le mot clef "*vmax*", suivi de la valeur de ce potentiel maximum.

***Vmax***

-6.

### III-10) Energie complexe

Il est possible d'utiliser une énergie complexe en cas de calcul en diffusion multiple (green). Pour ceci il faut spécifier la partie imaginaire (positive) sous la forme d'un tableau en fonction de l'énergie du photoélectron, sous le mot clef "*eimag*":

***Eimag***

0. 0.5

10. 0.7

30. 3.

100. 6.

Si on peut se contenter d'un élargissement uniforme sur toute la gamme d'énergie, on peut omettre l'énergie du photoélectron et écrire simplement :

***Eimag***

0.1

→ valeur de l'élargissement (eV)

L'utilisation d'une petite valeur (0.1 eV) est parfois utile pour les calculs à basse énergie cinétique du photo-électron car les niveaux localisés (4f ou 3d) peuvent être trop étroits en énergie et donc non correctement évalués. C'est encore plus vrai pour les calculs de photoémission qui sont à énergie cinétique négative (voir le mot clef "*photoemission*"). Dans la mesure où cet élargissement est petit, il ne gêne pas la convolution ultérieure faite pour prendre en compte les élargissements du trou et des états finaux.

### III-11) Rayon de l'agrégat pour la superposition du potentiel

Le potentiel à l'intérieur de la sphère de calcul, de rayon  $R_s$ , défini sous le mot clef "*radius*" est calculé par superposition. Pour éviter les effets de bord, les atomes pris en compte pour la superposition sont tous les atomes de la sphère de calcul plus une couronne extérieure. Par défaut cette couronne extérieure a 2.5 Å d'épaisseur définissant ainsi une nouvelle sphère de rayon  $R_s + 2.5$ . Si on veut un rayon plus grand (utile pour les oxydes) mettre le mot clef :

***Rpotmax***

15.

→ Rayon de l'agrégat pour la superposition en angström

**III-12) Approximation l+1 pour les règles de sélection**

On peut faire l'approximation l+1 où seules les transitions obéissant à  $\Delta l = +1$  sont autorisées (on néglige donc  $\Delta l = -1$ ). Par exemple pour les seuils L<sub>II</sub> et L<sub>III</sub>, on ne transite que vers les états d. Pour ça, mettre le mot clef :

***lplus1***

De même si on ne veut que les états l-1 mettre :

***lminus1***

**III-13) Séries de rydberg**

On peut rajouter une sphère extérieure ayant un potentiel en  $-1/r$  pour analyser les séries de rydberg. Dans ce cas mettre le mot clef "rydberg" :

***Rydberg***

**III-14) Origine de l'agrégat**

Par défaut l'origine de l'agrégat est ramenée sur l'atome absorbeur. Si on veut que l'origine soit telle qu'imposé par la structure moléculaire donnée en entrée mettre le mot clef :

***Noncentre***

Si on veut que le centre soit selon des coordonnées bien définies mettre :

***Centre***

0. 0.25 1. → coordonnées en unité paramètre de maille du centre

**III-15) Coupe du potentiel**

Pour avoir en sortie une coupe du potentiel selon un plan ou une ligne :

***Trace***

0 1.0 0.0 0.0 0.0 0.0 0.0 → l, a, b, c, p, q, r

l = 1 : coupe selon la ligne de vecteur (a,b,c) passant par le point (p,q,r), en unité paramètre de maille

l = 2 : coupe selon le plan  $ax + by + cz = p$

l = 3 : donne tous les points

### III-16) Densité d'état atomique

Pour avoir la densité d'état résolue par harmonique et son intégrale sur l'énergie projetée sur l'atome central, mettre le mot clef :

#### *Density*

Il y aura alors un fichier de sortie en plus par atome avec le suffixe `_sd0.txt`. Remarquer que seuls les états appartenant aux représentations qu'il est nécessaire de calculer pour obtenir les spectres demandés sont calculés. La densité d'état ainsi produite peut donc être incomplète. On peut aussi avoir la densité complète de tous les atomes en mettant `"State_all"` à la place de `"density"`. Le calcul est alors effectué sur toutes les représentations (ce qui peut-être plus long). On a alors  $n$  fichiers de sorties avec les suffixes `_sdi.txt`, où `"i"` est le numéro de l'atome. Ces fichiers contiennent en colonne d'abord l'intégrale totale de la densité puis la densité et son intégrale pour chaque  $(\ell, m)$  atomique suivi de la somme sur les  $m$ , c'est-à-dire la densité et l'intégrale pour chaque  $\ell$ . En cas de calcul magnétique, le développement est dédoublé en `"up"` et `"down"`.

Normalement pour un métal de transition, à la fin de la bande  $d$ , l'intégrale doit être proche de 10 (car il y a 10 électrons  $d$ !). A la fin d'une bande  $s$  ou  $p$  assez délocalisée, l'intégrale arrive rarement à 2 ou 6, car les électrons ne sont comptés qu'à l'intérieur de la sphère de rayon atomique  $R_{\text{mstd}}$  (voir sa valeur dans le fichier `bav`). Ces orbitales ayant un rayon relativement grand, on ne compte pas tout. Le calcul étant effectué dans le continuum, il faut aussi se rappeler que  $n$  n'est plus un bon nombre quantique, l'intégrale continue donc à augmenter indéfiniment avec l'énergie. A la fin d'une bande  $d$  (ou  $f$ ) relativement localisée on arrive néanmoins à peu près à 10 (ou 14). Dans ce cas, on peut retrouver la valeur du niveau de Fermi nécessaire pour la convolution, en regardant à quelle énergie l'intégrale des états  $d$  contient le nombre d'électron  $d$  correspondant à la population attendue. Si l'intégrale n'arrive pas à 10 (ou 14), mais à une valeur nettement inférieure ou supérieure, ce peut être dû au fait que le calcul ne commence pas à suffisamment basse énergie (on rate alors le début de la bande) ou que le pas en énergie est trop grand. Il faut alors mettre un pas plus fin (allant jusqu'à 0.01 eV, voir moins pour les  $4f$ ). Une autre technique pour garder un pas, pas trop petit consiste à introduire un petit élargissement avec le mot clef `"Eimag"` (ceci ne fonctionne qu'en `"Green"`).

### III-17) Tenseurs sphériques

Pour avoir en sortie les tenseurs sphériques (en nombre d'électron) mettre le mot clef :

#### *Spherical*

On a alors des fichiers de sortie supplémentaire avec les extensions `_sph_atom1` pour les tenseurs atomiques et `_sph_xtal` pour les tenseurs du cristal. Si on utilise un tel fichier en entrée de la partie convolution, on obtiendra les  $f'$  et  $f''$  de chaque élément de tenseur de l'atome. Il y a aussi un fichier avec l'extension `_sph_int.txt` qui contient l'intégrale de ces tenseurs.

Pour avoir aussi la contribution de chacune des composantes des tenseurs sphériques dans chaque réflexion et dans chaque polarisation XANES mettre à la place de `"spherical"` le mot clef :

***Sphere\_all***

On a alors toute une série de fichiers de sorties avec les extensions *\_sph\_signal\_xan.txt*, *\_sph\_signal\_poll.txt*, *\_sph\_signal\_rxs1.txt* pour les contributions sur chacune des polarisations et réflexions. Le numéro après *rxs* ou *pol* indique le numéro de polarisation ou de réflexion.

**III-18) Limite de la zone de calcul**

Par défaut, en différences finies, le maillage est effectué dans une sphère allant jusqu'au dernier atome (défini comme étant le dernier atome à l'intérieure de la sphère de rayon  $R_{sort}$ ) plus son rayon (environ 0.65 Å) + la distance inter point (0.25 Å par défaut). Pour pouvoir utiliser une zone plus grande mettre

***Overad***

1.2 → distance au delà du dernier atome + son rayon à prendre en compte.

**III-19) Déplacement de l'atome absorbeur**

Pour déplacer l'atome absorbeur par rapport à sa description sous "*molecule*" ou "*crystal*" mettre :

***Dpos***

0.2 0.0 0.0 → vecteur déplacement en angstroem

**III-20) Récupération des tenseurs d'un calcul précédant**

On peut récupérer les tenseurs d'un calcul précédant (se trouvant dans une sortie "*fdmnes\_out\_bav.txt*") et recalculer des polarisations différentes en incluant le mot clef "*Extract*" suivi du nom du fichier correspondant :

***Extract***

*c:\users\joly\xanout\calcul\_prec\_bav.txt*

En cas de calculs avec des absorbeurs en position non équivalentes dont le nombre correspond au nombre de fichiers de sortie, on doit extraire les tenseurs de ces n fichiers différents s'il y a n absorbeurs non équivalents. L'emploi du mot clef "*absorber*" est alors impératif. La liste des fichiers sous "*extract*" doit correspondre en nombre et en ordre à la liste des atomes sous "*absorber*" :

***Extract***

*c:/users/joly/xanout/calcul\_prec\_1\_bav.txt*

*c:/users/joly/xanout/calcul\_prec\_2\_bav.txt*

***Absorber***

1 2



On peut effectuer une série de rotations du repère local. Ceci peut être utile en cas d'utilisation de tenseurs calculés dans une base différente. On peut effectuer 1, 2 ou 3 rotations autour des axes Oz, puis Ox puis Oy. Chaque rotation définit un nouveau repère local, point de départ de la rotation suivante. Pour ça écrire :

***Rotsup***

30. 0. 45. → rotation de 30° autour de Oz, 0° autour de Ox puis 45° autour de Oy.

On peut aussi utiliser les opérations de symétrie habituelles en utilisant les codes définis dans le manuel avec le mot clef "symsite". Dans ce cas, on utilise le mot clef *extractsym* :

***Extract***

xanout/fe3o4/w\_g\_ch015\_3d55\_rs80\_1\_bav.txt

xanout/fe3o4/w\_g\_ch015\_3d55\_rs80\_1\_bav.txt

***Extractsym***

1 25 → code 1 pour l'identité, 25 pour l'inversion.

**III-21) Décalage des spectres en énergie**

Si on a une référence pour l'énergie de l'orbitale initiale, on peut la donner sous le mot clef "epsii". Ceci provoquera un décalage du spectre égal à la différence entre cette énergie et la valeur calculée dans le programme. Il vaut mieux faire ce genre d'opérations à l'aide des paramètres de décalage lors de la convolution

***Epsii***

6253.1 → valeur positive en eV.

**III-22) Développement en chemins**

Dans le mode diffusion multiple, plutôt que d'inverser la matrice, on peut faire un développement en chemins en spécifiant le nombre l'ordre du développement (ou nombre de chemins) avec lequel on limite le calcul :

***Chemin***

3 → nombre de chemins

**III-23) Tenseurs cartésiens**

Pour avoir les tenseurs cartésiens atomiques mettre le mot clef :

***Cartesian***

On a alors un fichier de sortie supplémentaire avec le suffixe \_car.txt. On peut alors utiliser d'autres mot clef qui feront qu'à partir de ce fichier de sortie seront calculés les f' et f'' de

chaque composante du tenseur. Pour cela il faudra mettre le mot clef "*fprim*" dans le fichier d'entrée.

### III-24) Spectres par atome

Si on veut connaître le signal venant de chaque atome, il faut ajouter le mot clef :

#### *Allsite*

On a alors en plus des fichiers de sortie habituels les fichiers de type *fdmnes\_out\_atom1.txt*, *fdmnes\_out\_atom2.txt*, etc... Les suffixes *\_atom1*, *\_atom2* désignent les atomes.

### III-25) Utilisation des densités et potentiels venant de FLAPW

Si le potentiel est importé du calcul FLAPW introduire le mot clef "*flapw*" à la place de "*atome*". Les mots clefs "*cristal*" ou "*molecule*" deviennent également inutiles. Ensuite doivent se trouver les noms des 5 fichiers de sortie de FLAPW en cas de calcul non polarisé en spin et 7 fichiers en cas de calcul polarisé.

<i>Flapw</i>	→ nom des fichiers contenant les sorties FLAPW
<i>tio2.struct</i>	structure et symétrie
<i>tio2.vcoul</i>	potentiel coulombien
<i>tio2.r2v</i>	potentiel d'échange-corrélation
<i>tio2.clmsum</i>	densité électronique
<i>tio2.ti1s</i>	fonction d'onde initiale

Dans le cas du calcul polarisé, le mot clef "*magnetism*" doit être avant *flapw* :

#### *Magnetism*

<i>Flapw</i>	
<i>tio2.struct</i>	structure et symétrie
<i>tio2.vcoul</i>	potentiel coulombien
<i>tio2.r2v</i>	potentiel d'échange-corrélation spin up et spin down
<i>tio2.clmsum</i>	densité électronique totale
<i>tio2.clmup</i>	densité électronique des électrons de valence, spin up
<i>tio2.clmdn</i>	densité électronique des électrons de valence, spin down
<i>tio2.ti1s</i>	fonction d'onde initiale

Le dernier fichier contient la fonction d'onde de l'état de cœur initial. Si on se contente de la fonction d'onde initiale calculée de façon interne au programme, on peut l'omettre. Il faut alors aussi substituer "*flapw*" par "*flapw\_psi*".

Si on veut avoir un potentiel d'échange-corrélation dépendant de l'énergie, il faut rajouter le mot clef "*hedin*".

Par défaut l'atome absorbeur est le premier dans la liste du fichier ".*struct*". Si on veut que ce soit le n<sup>ième</sup> mettre le mot clef :

**Absorber***n***III-26 Saut dans le fichier d'entrée**

Il est possible de sauter une partie des informations du fichier d'entrée principal avec les mots clefs "*Jump*" et "*Endjump*". Tout ce qui est entre ces deux mots clefs n'est pas lu. Exemple :

***Jump****Quadrupole**Spinorbite*

***Endjump*** → Les mots clefs "*Quadrupole*" et "*Spinorbite*" sont ignorés.

**III-27 Commentaire**

Il est possible d'introduire une ligne de commentaire qui sera recopié dans les fichiers de sortie. Il suffit d'écrire :

***Comment***

Iron K-edge in magnetite

→ ligne de commentaire

**IV-28 Signal atomique**

Pour avoir en dernière colonne du fichier de sortie, le signal XANES atomique (sans les voisins), mettre le mot clef :

***Xan\_atom*****IV-29 Diffusion magnétique non résonante**

La diffusion magnétique non résonante est automatiquement prise en compte pour le RXS. Celle-ci peut être atténuée, ou même annulée, à l'aide d'un facteur multiplicatif :

***No\_res\_mag***

0.8

→ facteur d'atténuation

Un facteur d'atténuation supplémentaire peut être introduit pour la partie correspondant au moment orbitalaire, c'est-à-dire au rapport  $L/2S$  (et non  $L/S$ ) :

***No\_res\_mom***

-0.3

→ facteur d'atténuation supplémentaire

Par défaut, ce facteur est fixé selon les règles de Hund puis multiplié par 0.2.

## IV- Mots clefs techniques

Ce chapitre concerne les mots clefs qui ont essentiellement un intérêt technique pour les experts qui veulent faire certains tests.

### IV-1) Détails sur les calculs

Pour avoir des détails sur les calculs effectués dans chaque routine :

#### *Check*

3 3 3 3 1 1 1 1	→ Main, Lectur, Prepar, Agregat, Etafin, Distan, Reseau, Laplac,
1 1 1 1 1 1 1 1	→ Bord, Potato, Orbval, Poisso, Pot0, Ylmsrt, Ylmatm, Potex,
1 1 1 1 1	→ Phisort, Sphere, Newind, Mat+MSM, Coabs

Les valeurs peuvent aller de 0 à 4 pour avoir de plus en plus de détails.

Par défaut, on a 1 pour toutes les routines. On peut aussi mettre

<i>check_all</i>	→ équivalent à mettre icheck = 3 pour tous les sous-programmes
<i>no_check</i>	→ équivalent à mettre icheck = 0 pour tous les sous-programmes
<i>check_pot</i>	→ équivalent à icheck = 3 pour tout ce qui concerne le potentiel
<i>check_mat</i>	→ équivalent à icheck = 3 pour les matrices MSM ou FDM
<i>check_sph</i>	→ équivalent à icheck = 3 pour la routine "sphere"
<i>check_coabs</i>	→ équivalent à icheck = 3 pour la routine "coabs"

### IV-2) Symétrie

La symétrie ponctuelle est calculée automatiquement. Cependant, les utilisateurs experts peuvent l'imposer avec le mot clef :

#### *Sym*

2/m → coefficient de Schoenflies ou table internationale de cristallographie. Attention que ces symétries ne sont prévues que dans les axes cristallographiques donnés en entrée.

### IV-3) Base des tenseurs

Par défaut, les tenseurs atomiques donnés dans les fichiers de sorties sont exprimés dans la base orthonormée  $R_1$  où  $z$  est l'axe  $c$  du cristal (sauf dans le cas d'une structure trigonal où  $z$  est l'axe  $c$  de la structure hexagonale associée),  $x$  est selon  $b \times c$  et  $y$  selon  $z \times x$ . Il est cependant possible d'exprimer ce tenseur dans la base où il est effectivement calculé, la base dite  $R_2$ . Par rapport à  $R_1$ , une rotation supplémentaire est éventuellement effectuée en cas de calcul magnétique pour mettre  $z$  selon l'axe des spins, puis une nouvelle rotation de  $\pm 45^\circ$  est aussi éventuellement effectuée autour de cet axe, en cas de plan de symétrie ou d'axe 2 dans une diagonale. Pour cela, mettre le mot clef:

#### *Base\_spin*

#### IV-4) Base du calcul

Par défaut la connexion au continuum est en base réelle (neuman, bessell). Pour utiliser une base complexe (bessel, hankel) mettre :

**Basecomp**

#### IV-5) Atomes équivalents

Le programme calcule automatiquement le signal venant de la somme des atomes équivalents par symétrie. Il est cependant possible pour les utilisateurs expert de *fdmnes* d'imposer les relations de symétrie entre atomes et donc d'imposer cette sommation. Il faut pour cela utiliser le mot clef "*symsite*". A la suite de ce mot clef on précise le nombre de groupes d'atomes (ou nombre d'atomes non équivalents), puis pour chacun d'eux, le nombre d'atomes équivalents suivi de la liste avec les symétries relatives au premier atome de la série puis le position des atomes en unité paramètre de maille. Les symétries sont décrites par un nombre entier allant de 1 à 64 dont la liste est donnée plus bas.

**Symsite**

```

3          ! nombre d'atomes non équivalents (ou nombre de groupes)
4          ! nombre d'atomes équivalents, groupe 1
 1 0.2500 0.2500 0.2500
24 0.7500 0.7500 0.2500
23 0.7500 0.2500 0.7500
22 0.2500 0.7500 0.7500
4          ! nombre d'atomes équivalents, groupe 2
 1 0.0000 0.0000 0.0000
22 0.0000 0.5000 0.5000
23 0.5000 0.0000 0.5000
24 0.5000 0.5000 0.0000
4          ! nombre d'atomes équivalents, groupe 3
 1 0.5000 0.5000 0.5000
23 0.0000 0.5000 0.0000
22 0.5000 0.0000 0.0000
24 0.0000 0.0000 0.5000

```

Les indices négatifs correspondent à la même symétrie plus renversement du temps (dans le cas du magnétisme).

Codes de symétrie :

1: identité	7 : rot $4\pi/3$ autour de (-1,1,1)
2 : rot $2\pi/3$ autour de (1,1,1)	8 : rot $2\pi/3$ autour de (1,1,-1)
3 : rot $4\pi/3$ autour de (1,1,1)	9 : rot $4\pi/3$ autour de (1,1,-1)
4 : rot $2\pi/3$ autour de (1,-1,1)	10: rot $2\pi/2$ autour de (1,1,0)
5 : rot $4\pi/3$ autour de (1,-1,1)	11: rot $2\pi/2$ autour de (-1,1,0)
6 : rot $2\pi/3$ autour de (-1,1,1)	12: rot $2\pi/2$ autour de (1,0,1)

- |  |  |
|--|--|
| 13: rot $2\pi/2$ autour de (-1,0,1)              | 39: rot $4\pi/3$ autour de (1,1,-1) et inversion       |
| 14: rot $2\pi/2$ autour de (0,1,1)               | 40: plan perpendiculaire à 0x                          |
| 15: rot $2\pi/2$ autour de (0,-1,1)              | 41: plan perpendiculaire à 0y                          |
| 16: rot $2\pi/4$ autour de 0x                    | 42: plan perpendiculaire à 0z                          |
| 17: rot $2\pi/4$ autour de 0y                    | 43: plan diagonal y = z contenant 0x                   |
| 18: rot $2\pi/4$ autour de 0z                    | 44: plan diagonal x = z contenant 0y                   |
| 19: rot $-2\pi/4$ autour de 0x                   | 45: plan diagonal x = y contenant 0z                   |
| 20: rot $-2\pi/4$ autour de 0y                   | 46: plan diagonal y = -z contenant 0x                  |
| 21: rot $-2\pi/4$ autour de 0z                   | 47: plan diagonal x = -z contenant 0y                  |
| 22: rot $2\pi/2$ autour de 0x                    | 48: plan diagonal x = -y contenant 0z                  |
| 23: rot $2\pi/2$ autour de 0y                    | 49: rot $2\pi/3$ autour de 0z                          |
| 24: rot $2\pi/2$ autour de 0z                    | 50: rot $4\pi/3$ autour de 0z                          |
| 25: inversion                                    | 51: rot $2\pi/6$ autour de 0z                          |
| 26: rot $2\pi/4$ autour de 0x et inversion       | 52: rot $10\pi/6$ autour de 0z                         |
| 27: rot $2\pi/4$ autour de 0y et inversion       | 53: rot $2\pi/3$ autour de 0z, axe négatif             |
| 28: rot $2\pi/4$ autour de 0z et inversion       | 54: rot $4\pi/3$ autour de 0z, axe négatif             |
| 29: rot $-2\pi/4$ autour de 0x et inversion      | 55: rot $2\pi/6$ autour de 0z, axe négatif             |
| 30: rot $-2\pi/4$ autour de 0y et inversion      | 56: rot $10\pi/6$ autour de 0z, axe négatif            |
| 31: rot $-2\pi/4$ autour de 0z et inversion      | 57: plan à $30^\circ$ contenant 0z                     |
| 32: rot $2\pi/3$ autour de (1,1,1) et inversion  | 58: rot $\pi$ autour de l'axe à $30^\circ$ perp. à 0z  |
| 33: rot $4\pi/3$ autour de (1,1,1) et inversion  | 59: plan à $60^\circ$ contenant 0z                     |
| 34: rot $2\pi/3$ autour de (1,-1,1) et inversion | 60: rot $\pi$ autour de l'axe à $60^\circ$ perp. à 0z  |
| 35: rot $4\pi/3$ autour de (1,-1,1) et inversion | 61: plan à $120^\circ$ contenant 0z                    |
| 36: rot $2\pi/3$ autour de (-1,1,1) et inversion | 62: rot $\pi$ autour de l'axe à $120^\circ$ perp. à 0z |
| 37: rot $4\pi/3$ autour de (-1,1,1) et inversion | 63: plan à $150^\circ$ contenant 0z                    |
| 38: rot $2\pi/3$ autour de (1,1,-1) et inversion | 64: rot $\pi$ autour de l'axe à $150^\circ$ perp. à    |

#### IV-6) Orientations

Pour restreindre le calcul aux orientations réellement utiles mettre les mots clef "*ldipimp*" et "*lquaimp*" respectivement pour les composantes dipolaire et quadripolaire :

##### ***Ldipimp***

1 0 0                      ne calculera que la polarisation selon 0x

##### ***Lquaimp***

0 0 1                      ne calculera que les termes xz  
 0 0 0  
 0 0 0

**IV-7) Etats liés**

Si on veut modifier l'énergie cinétique à laquelle sont calculés les niveaux liés (en dessous du potentiel moyen), mettre le mot clef "*etatlie*" suivi de l'énergie cinétique en eV :

*Etatlie*  
0.05

**IV-8) Inversion de la matrice en mode diffusion multiple**

Par défaut, on inverse la matrice  $(\kappa^{-1} + i + G)$  où  $\kappa$  correspond à la normalisation neuman-bessel. Pour éviter des problèmes éventuels de convergence (non constatés jusqu'à présent), on peut préférer calculer  $(1 + G\tau)^{-1}\tau$ . Pour cela, utiliser le mot clef :

*Normaltau*

**IV-9) Potentiel muffin-tin**

Si on veut imposer un potentiel de type muffin-tin (et sans overlap) même en différences finies introduire le mot clef :

*Muffintin*

**IV-10) Absorbeur non excité**

Pour effectuer un calcul avec un absorbeur non excité mettre :

*Nonexc*

L'atome absorbeur est dans son état initial avant absorption du photon.

**IV-11) Modification des paramètres du maillage**

Par défaut, le calcul en différences finies est à l'ordre 4 avec une distance inter point de 0.25 Å et des rayons de zone à symétrie sphérique sont de l'ordre de 0.65 Å (moins pour les éléments légers. Pour modifier l'une ou l'autre de ces valeurs mettre:

*Rmt* → Pour modifier le rayon muffin-tin  
0.65

*Adimp* → Pour modifier la distance interpoint  
0.20

*Iord* → Pour modifier l'ordre du développement de Taylor  
2

## IV-12) Développement en harmoniques sphériques

Un développement en harmoniques sphériques est effectué dans les atomes aussi bien en diffusion multiple (green) qu'en différences finies (mais jusqu'à un rayon plus petit). La valeur maximum du second nombre quantique  $\ell$  est calculée à partir de la formule  $kr = \sqrt{\ell_{\max}(\ell_{\max} + 1)}$ , où  $k$  est le vecteur d'onde du photoélectron et  $r$  le rayon muffin-tin (Rmtg dans le fichier bav). Par défaut, à cette valeur on ajoute 1. Pour fixer une valeur de  $\ell_{\max}$  indépendante de l'énergie, il suffit d'écrire :

**Lmax**            → La valeur de  $\ell_{\max}$  est fixée à 3  
3

Si on veut conserver la formule dépendant de l'énergie mais ajouter à cette valeur 1, 2 ou plus, il faut mettre un signe négatif devant  $\ell$  :

**Lmax**            → La valeur de  $\ell_{\max}$  est fixée est donné par la formule plus 2.  
-2

Quand l'énergie augmente la valeur de  $\ell_{\max}$  augmente. Par défaut le  $\ell_{\max}$  est plafonné à 2 pour  $Z = 1$ , à 2 pour  $Z = 2$  puis à 4 pour  $Z \leq 18$ , puis à 5 pour  $Z \leq 36$ , puis à 6 pour  $Z \leq 54$ , puis à 7 pour  $Z \leq 86$  et enfin à 8 au-delà. Pour s'affranchir de cette limitation, mettre le mot clef :

**Lmaxfree**

En cas de calcul en différences finies, la connexion à la sphère extérieure s'effectue de la même façon. La valeur du  $\ell_{\max}$  est obtenue par la même formule où  $r$  est maintenant la valeur du rayon de la sphère extérieur. Par défaut, on ajoute 5 à cette formule. Pour modifier ceci on procède comme pour les atomes, en remplaçant lmax par lmaxso :

**Lmaxso**            → Pour modifier la valeur maximum du second nombre quantique dans  
15                    la sphère exrérieure. Mettre une valeur négative si on veut conserver la  
formule dépendant de l'énergie.

## IV-13) Rayon muffin-tin

Par défaut, le rayon muffin-tin est calculé pour avoir un saut de potentiel proche pour tous les atomes. On peut le modifier par l'utilisation de divers mots clefs.

Si on veut que les rayons muffin-tin soient calculés selon la méthode de Norman, introduire le mot clef :

**Norman**

Si on veut que les rayons muffin-tin soient égaux à la demi distance inter atomique, introduire le mot clef :

**Raydem**



Par défaut, il y a un recouvrement des sphères muffin-tin de 10%. Si on veut le modifier mettre le mot clef "*overlap*" suivi de la fraction de recouvrement :

***Overlap***

0.15 → 15% de recouvrement

Si on veut que le rayon soit déterminé par la valeur qu'il prend quand le potentiel atomique est égal au potentiel interstitiel, mettre *rmtv0* suivi de la valeur de ce potentiel (qui remplace celui défini par le mot clef *v0imp*) :

***Rmtv0***

-12.

Si on veut imposer le rayon pour chaque espèce chimique mettre *rmtimp* suivi du rayon en angström de chaque espèce chimique d'atome.

***Rmtimp***

0.65

1.1

Le programme donne en sortie la charge intégrée se trouvant à l'intérieur de la sphère définie par son rayon soit. Si on veut avoir se résultat pour un autre rayon indépendant mettre :

***Rchimp***

→ mot clef correspondant

1.2

→ valeur des rayons pour chaque type d'atome

0.7

Pour limiter le saut en potentiel entre la zone interstitielle et les sphères muffin-tin par une interpolation linéaire sur le potentiel sur les derniers 10% du rayon mettre :

***Supermuf***

#### IV-14 Format des nombres

Les nombres sont écrits dans les fichiers de sorties selon des chaînes comportant 15 caractères dont 7 après la virgule. Pour changer ceci, mettre :

***Length\_word***

16

→ nombre de caractères (entre 11 et 17)

#### IV-15 Longueur des lignes

Les lignes sont lues sur une certaine longueur. Quand on lit des fichiers ayant un grand nombre de colonnes (calcul de plus de 100 spectres RXS par exemple), la longueur des lignes par défaut (3020 caractères) peut être insuffisante. Pour la modifier mettre :

***Length\_line***

4000

→ nombre de caractères maximum d'une ligne

## C- Convolution

Le programme *fdmnes* permet de faire:

1) la convolution par une lorentzienne des spectres d'absorption en éliminant les états occupés. Pour la diffraction anormale il effectue la sommation sur les états finaux inoccupés d'énergies différentes puis calcule l'intensité des réflexions.

2) une sommation pondérée entre diverses sorties de l'étape de calcul précédente. Cette sommation est accompagnée d'un éventuel décalage en énergie.

Cette étape du calcul peut être faite en même temps que la précédente en ajoutant seulement les mots clefs correspondants. Elle peut aussi être faite indépendamment en écrivant un autre fichier d'entrée qui ne contiendra que les mots clefs liés à la convolution. Voici un exemple:

<b>Calculation</b>	→ Pour donner le nom des fichiers contenant les spectres
<i>g_rs43.txt</i>	→ nom du fichier
<b>Conv_out</b>	→ Pour donner le nom du fichier contenant les spectres convolués
<i>g_rs43_conv.txt</i>	→ nom du fichier de sortie
<b>Convolution</b>	→ mot clef pour spécifier une forme "arctangeante" pour la convolution
<b>Efermi</b>	→ Energie de Fermi ( $E_F$ ) par rapport au zéro du calcul.
<i>-5.5</i>	

### Mots clefs pour la convolution

#### a) Nom des fichiers

Le ou les fichiers d'entrée de la convolution sont les fichiers de sortie de l'étape précédente du calcul dont le nom ou les noms sont définis sous "*filout*". Quand la convolution est effectuée avec le calcul principal, il n'est pas nécessaire de respécifier ce nom. Dans le cas contraire il faut le ou les introduire avec le mot clef "*Calculation*":

<b>Calculation</b>	→ Pour donner le nom des fichiers contenant les spectres
<i>g_rs43.txt</i>	→ nom du fichier

Un autre exemple avec 2 fichiers d'entrées et des décalages en énergies :

<b>Calculation</b>	
<i>Fe_rs64_01.txt</i>	→ nom du fichier 1
<i>1.0 -0.2</i>	→ poids, décalage (en eV)
<i>Fe_rs64_02.txt</i>	→ nom du fichier 2
<i>1.0 0.2</i>	→ poids, décalage

Le poids s'applique sur les spectres XANES et sur les amplitudes de diffusion anormale. En cas de calcul RXS, en seconde ligne des fichiers de sortie avant convolution se trouvent les termes de Thomson additionnés des composantes anormales des atomes non résonnants. La pondération appliquée sur ces termes est le poids divisé par la somme des poids appliqués à tous les fichiers. Ceci permet de prendre en compte la configuration moyenne pour des atomes non résonnant en substitution. Si c'est l'atome résonnant qui n'a pas un taux d'occupation de 1, il faut, en plus du poids, utiliser le mot clef "*Thomson*".

Le fichier de sortie de la convolution a par défaut le nom du fichier d'entrée avec pour suffixe "*\_conv.txt*". On peut cependant imposer un nom de fichier de sortie avec le mot clef :

### ***Conv\_out***

*Fe\_rs64\_sum\_conv.txt* → nom du fichier convolué

En cas de scan azimutal il faut aussi donner le nom des fichiers d'entrée correspondants (de type *\_scan.txt*) et le nom du nouveau fichier de sortie. Ceci se met après le mot clef "*scan*":

### ***Scan***

*Fe\_rs64\_01\_scan.txt* → nom du fichier d'entrée dafs 1  
*Fe\_rs64\_02\_scan.txt* → nom du fichier d'entrée dafs 2  
*Fe\_rs64\_scan\_conv.txt* → nom du fichier de sortie contenant les scans convolués

Pour définir un répertoire de travail mettre le mot clef "*directory*" suivi du nom du répertoire avec à la fin le séparateur (/ ou \) :

### ***Directory***

*C:\Documents and Settings\joly\Mes documents\xanes\xanout\203\*

## **b) Niveau de Fermi**

Les états en dessous du niveau de Fermi  $E_F$  sont occupés. La section efficace est donc mise à zéro, avant la convolution. Par défaut, ce niveau est mis à -5eV. Cependant, celui-ci doit en général être spécifié à l'aide du mot clef :

### ***Efermi***

-5. → Energie de Fermi ( $E_F$ ) par rapport au zéro du calcul.

Le niveau de Fermi est appliqué avant décalage en énergie puisqu'en principe le décalage sert à simuler le décalage du niveau de cœur. Cependant si l'on veut l'appliquer après le décalage en énergie, il faut introduire le mot clef :

### ***Dec***

Il est aussi possible de mettre des niveaux de Fermi différents pour chaque fichier. Ceci se fait sous "*Calculation*", en mettant cette valeur en troisième colonne sous chaque nom :

**Calculation***Fe\_rs64\_01.txt*

1.0 0.2 -5.

*Fe\_rs64\_02.txt*

1.0 -0.2 -5.9

→ Pour donner le nom des fichiers contenant les spectres

→ nom du fichier 1

→ poids, décalage, EFermi

→ nom du fichier 2

→ poids, décalage, EFermi

Le niveau de Fermi éventuellement spécifié dans "*Efermi*" n'est alors plus pris en compte.

**c) Largeur de convolution**

La convolution à appliquer dépend de la largeur du niveau de cœur ( $\Gamma_{\text{Hole}}$ ) et de la largeur des niveaux d'arrivée.  $\Gamma_{\text{Hole}}$  est déterminée automatiquement, cependant sa valeur peut être imposée par le mot clef:

***Gamma\_hole***

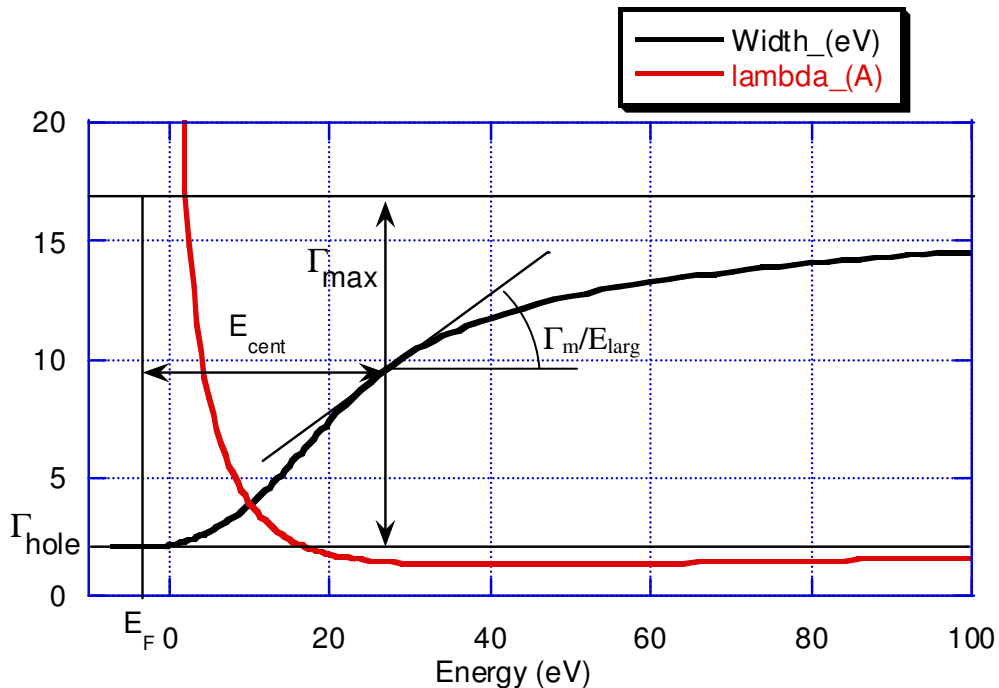
2.05

→ Largeur du niveau de coeur ( $\Gamma_{\text{Hole}}$ ) en eV.

Il y a plusieurs façons de décrire la largeur de convolution dépendante de l'énergie. La première utilise une formule en arctangente du type :

$$\Gamma = \Gamma_{\text{Hole}} + \Gamma_m \left( \frac{1}{2} + \frac{1}{\pi} \arctan \left( \frac{\pi}{3} \frac{\Gamma_m}{E_{\text{Larg}}} \left( e - \frac{1}{e^2} \right) \right) \right)$$

avec:  $e = \frac{E - E_F}{E_{\text{cent}}}$  où  $\Gamma_m$ ,  $E_{\text{cent}}$  et  $E_{\text{Larg}}$  sont respectivement la largeur maximum (à haute énergie) du niveau d'arrivée, le centre et la largeur de la fonction arctangeante. La pente au centre de l'arctangeante est  $\Gamma_m/E_{\text{Larg}}$ . La courbe typique est donnée ci-dessous :



Une telle convolution est introduite par le mot clef :

**Convolution**

(Dans les versions précédente, c'était le mot clef *Arc*.) Quand aucun nombre n'est défini sous *arc*, des valeurs par défaut de  $E_{\text{larg}}$ ,  $E_{\text{cent}}$  et  $\Gamma_m$  sont choisis, respectivement : 30, 30 et 15 eV. On peut les modifier en les précisant dans l'ordre sous "*Convolution*" :

**Convolution**

30. 30. 20.  $\rightarrow E_{\text{cent}}, E_{\text{larg}}, \Gamma_m$

On peut aussi les modifier individuellement :

**Ecent**

30.  $\rightarrow E_{\text{cent}}$

**Elarg**

30.  $\rightarrow E_{\text{larg}}$

**Gamma\_max**

20.  $\rightarrow \Gamma_m$

Lors de la convolution, au cours de chaque intégration, c'est la largeur de l'énergie courante qui est choisie. On peut choisir plutôt la largeur du niveau d'arrivée correspondant à l'énergie du photon élastique. On intègre ainsi avec une largeur fixe. Ceci semble améliorer les spectres xanes, l'autre méthode semblant créer un fond trop élevé dans le pré-seuil. Pour faire ceci, bien que l'auteur ne comprenne pas pourquoi ça marche mieux, mettre le mot clef :

**Gamma\_fix**

Il est aussi possible d'utiliser la formule de Seah-Dench pour calculer l'élargissement des niveaux d'arrivée. Dans ce cas, on a :

$$\Gamma = \frac{A\Gamma_m E_p}{\Gamma_m + AE_p} + \Gamma_{\text{Hole}}, \quad \lambda = \frac{1}{A\sqrt{E_p}} + \frac{\sqrt{E_p}}{\Gamma_m}, \quad \text{avec: } E_p = E - E_F.$$

Ceci est fait avec le mot clef :

**Seah**

1. 20.  $\rightarrow A, \Gamma_m$

La largeur peut aussi s'exprimer par un simple tableau avec le mot clef "*table*" :

**Table**

0.0 1.  $\rightarrow$  Energie (E-E<sub>F</sub>) et élargissement  $\Gamma(E-E_F)$   
 10.0 15.  
 20.0 2.  
 30.0 3.5  
 100.0 5.

Si le mot clef "*Efermi*" est utilisé sans les mots clefs "*Convolution*" ou "*Seah*", la largeur de convolution est constante et égale à la largeur du niveau de coeur. Dans tous les cas, la forme de la courbe de convolution peut être obtenue dans un fichier de sortie appelé *gamma\_conv.txt* si l'on introduit le mot clef :

### ***Check\_conv***

Pour simuler la résolution expérimentale il est aussi possible de convoluer par une gaussienne. Cette convolution est effectuée après la convolution par la lorentzienne. Pour ceci, il faut écrire :

***Gaussian***                    → mot clef  
*l.*                                → largeur de la gaussienne

Cette même convolution peut servir à simuler de façon grossière l'effet des vibrations thermiques dues à la température. Ceci n'est en fait valable que pour la partie étendue du spectre. Dans ce cas on applique le principe «  $kr = \text{constante}$  » et la largeur de convolution devient proportionnelle à l'énergie. Le paramètre à écrire est l'amplitude relative de la vibration par rapport à la distance interatomique. Ceci se fait en mettant un deuxième nombre sous "*Gaussian*":

***Gaussian***                    → mot clef  
*l. 0.05*                        → largeur de la gaussienne, amplitude relative de la vibration

### **d) Autres mots clefs**

Pour ne pas tenir compte du terme de Thomson  $f_0$  (comme si la raie était interdite) mettre:

### ***Forbidden***

Pour avoir des spectres en sortie commençant à plus basse énergie mettre :

***Estart***  
*-8.*                            → valeur de l'énergie minimale (eV)

Quand il y a plusieurs fichiers *d'entrées*, le programme n'utilise que l'intersection des gammes d'énergies entre ces divers fichiers. Pour utiliser au contraire l'union de toutes les gammes, mettre le mot clef :

### ***Nocut***

Pour avoir les valeurs de  $f'$  et  $f''$ , utiliser le mot clef :

### ***Fprime***

Dans le fichier de sortie, pour chaque réflexion, il y a alors 3 colonnes,  $f'$ ,  $f''$  puis intensité. L'intensité correspond à celle de la maille,  $f'$  et  $f''$  sont pour un atome de la maille.  $f'$  contient aussi  $f_0$ . Pour avoir seulement  $f''$ , mettre aussi le mot clef "*forbidden*".

Pour avoir les valeurs de  $f'$  et  $f''$  atomique (atome isolé) :

### ***Fprime\_atom***

Les valeurs de  $f'$  et  $f''$  atomiques se trouvent alors dans un fichier de sortie supplémentaire avec le suffixe *\_fprime\_ato.txt*

Il peut être utile d'imposer une valeur particulière pour la somme des composantes non résonantes (de Thomson) et des termes anomaux des autres atomes. Ceci est par exemple le cas lors de taux d'occupation non égal à 1. C'est-à-dire de  $\sum_a p_a (f_{0a} + f'_a + if''_a) e^{i\vec{Q} \cdot \vec{R}_a}$ , avec  $f'_a$  et  $f''_a$  considérés seulement pour les autres espèces chimiques et où  $p_a$  est le taux d'occupation du site  $a$ . Ces termes complexes constants dans toute la gamme d'énergie sont introduits à l'aide du mot clef :

### ***Thomson***

1.1670478E+02 1.0583769E+02 1.1477827E+02 -8.2670689E+01

Dans la seconde ligne se trouvent ces termes, ici pour 2 réflexions. Ils remplacent les valeurs calculées par le programme et se trouvant à la deuxième ligne des fichiers de sortie.

### ***Photoemission***

Avec le mot clef "*photoemission*", c'est le spectre de photoémission qui est calculé. Ceci consiste simplement à couper au dessus du niveau de Fermi et non pas en dessous comme en XANES. L'élargissement de convolution est alors indépendant de l'énergie et fixée par défaut à la largeur du trou. Cette largeur peut être réduite par l'utilisation du mot clef "*Gamma\_hole*". Remarquez qu'on aura eu intérêt de faire auparavant un calcul selon le mode "green" avec un élargissement minimum (mot clef "*eimag*") d'au moins 0.1 eV, tout ceci selon une gamme d'énergie adéquat pour la photoémission.

### **Atténuation due aux effets multiélectroniques**

Dans une approche simple, l'effet multiélectronique peut être vu comme une simple atténuation de la section efficace d'absorption ou du terme résonant en diffraction. Cette atténuation, non prise en compte par défaut, peut être introduite par le mot clef "*S0\_2*". Elle est de l'ordre de 0.8.

### ***S0\_2***

0.8 → valeur de l'atténuation sur l'amplitude

Si on met  $S0_2 = 0$ , en diffraction, il ne reste que le terme non résonant.



## D- Optimisation des paramètres

Il est possible de comparer les calculs à des spectres expérimentaux à l'aide de facteurs de confiances ou distances métriques. Les distances métriques pour comparer les spectres individuels théoriques ( $f_{th}^{(i)}$ ) aux spectres expérimentaux ( $f_{exp}^{(i)}$ ) sont données par :

$$D_1^{(i)} = \frac{1}{2} \int \left| \frac{1}{c_{th}^i} f_{th}^{(i)}(e) - \frac{1}{c_{exp}^i} f_{exp}^{(i)}(e) \right| de,$$

$$D_2^{(i)} = \frac{1}{2} \int \left| \frac{1}{c_{th}^i} F_{th}^{(i)}(e) - \frac{1}{c_{exp}^i} F_{exp}^{(i)}(e) \right| de,$$

avec à chaque fois le facteur de normalisation:  $c = \frac{E_{max}}{E_{min}} \int f(e) de$

Les  $F$  sont les intégrales des  $f$ . Le  $R$  facteur (ou facteur de confiance) est un facteur conventionnel (voir E. Zanazzi and F. Jona, Surf. Sci. 62, 61 (1977)) donné par :

$$R_X^{(i)} = \frac{13}{6} \frac{e \sum \left| c_i f_{th}^{(i)}(e) - f_{exp}^{(i)}(e) \right|^2}{\sum_e \left| f_{exp}^{(i)}(e) \right|^2}, \quad \text{avec } c_i \text{ tel que: } \frac{\partial R_X^{(i)}}{\partial c_i} = 0$$

Enfin pour les  $n$  spectres, on obtient les distances métriques et  $R$  facteur totaux avec:

$$D_{1,2} = \sum_{i=1,n} p_i D_{1,2}^{(i)} \quad \text{et} \quad R_X = \frac{6}{13} \left( \frac{3}{2n} + \frac{2}{3} \right) \sum_{i=1,n} p_i R_X^{(i)}$$

où les  $p_i$  sont les poids relatifs pour chaque spectre " $i$ " donnés par :  $p_i = \frac{E_{max}^{(i)} - E_{min}^{(i)}}{\sum_{j=1,n} E_{max}^{(j)} - E_{min}^{(j)}}$

Il est possible de faire varier certains paramètres afin d'optimiser l'accord entre expérience et calcul. Les résultats sont alors donnés dans une grille multi-dimensionnelle de paramètres. Les valeurs des métriques distances sont données dans un fichier de sortie spécial. Par défaut pour un calcul complet, il a le nom de la sortie conventionnelle de fdmnes avec en plus le suffixe *\_fit.txt*. Pour un calcul commençant à la convolution, le nom par défaut est *fdmfit\_out.txt*. Ce nom peut être modifié en utilisant un mot clef.

Pour effectuer tout ce travail, il faut ajouter certains mots clef :

<b>Experiment</b> <i>Nom_exp</i>	→ Mot clef précédant le ou les noms des fichiers contenant les spectres expérimentaux
<b>Gen_shift</b> <i>7108 7114 21</i>	→ Décalage minimum et maximum en énergie entre le calcul et l'expérience et nombre de valeurs de la grille à tester.
<b>Metric_out</b> <i>File_name_fit.txt</i>	→ Nom du fichier de sortie contenant les valeurs des distances métriques
<b>Parameter</b> <i>Par_Gamma_max</i> <i>15. 25. 5</i>	→ Mot clef précédant chaque groupe de paramètres corrélés → Mot clef pour designer le paramètre $\Gamma_m$ de la convolution → Première et dernière valeurs et nombre de valeurs

**Parameter**

<b>Par_Posx</b>	→ Mot clef pour designer le paramètre position selon x
-0.05 0.05 3 1	→ Première et dernière valeurs, nombre de valeurs, et numéro de l'atome
<b>Par_Posy</b>	
-0.05 0.05 3 1	

Dans l'exemple au dessus les paramètres Posx et Posy de l'atome 1 sont complètement corrélés. On déplace donc l'atome selon la diagonale.

Les paramètres possibles à optimiser sont :

Pour la convolution :

Par_ecent	→ Energie centrale de l'arctangeante
Par_elarg	→ Energie d'élargissement de l'arctangeante
Par_efermi	→ Energie de Fermi
Par_gamma_hole	→ Largeur du trou
Par_gamma_max	→ Largeur maximale des niveaux d'arrivées
Par_gauss	→ Largeur de la gaussienne
Par_shift	→ Valeur du décalage en énergie
Par_weight	→ Poids
Par_aseah	→ Valeur du premier paramètre de Seah-dench

Pour le calcul des spectres :

Par_a	→ Contraction ou dilatation du paramètre de maille a en %
Par_b	→ Contraction ou dilatation du paramètre de maille b en %
Par_c	→ Contraction ou dilatation du paramètre de maille c en %
Par_abc	→ Contraction ou dilatation générale en %
Par_anga	→ Valeur de l'angle de la maille $\alpha$
Par_angb	→ Valeur de l'angle de la maille $\beta$
Par_angc	→ Valeur de l'angle de la maille $\gamma$
Par_poporb	→ population d'une orbitale
Par_posx	→ position selon x d'un atome
Par_posy	→ position selon y d'un atome
Par_posz	→ position selon z d'un atome
Par_dposx	→ écart de la position selon x d'un atome par rapport à la position initiale
Par_dposy	→ écart de la position selon y d'un atome par rapport à la position initiale
Par_dposz	→ écart de la position selon z d'un atome par rapport à la position initiale
Par_theta	→ position selon $\theta$ d'un atome en coordonnées sphériques
Par_phi	→ position selon $\phi$ d'un atome en coordonnées cylindriques ou sphériques

Sous chaque paramètre doit se trouver la première et la dernière valeur du paramètre suivi du nombre de valeurs.

Sous les paramètres Par\_posx, Par\_posy, Par\_posz, Par\_theta, Par\_phi doit se trouver en 4<sup>ème</sup> position le numéro d'atome.

Sous le paramètre Par\_poporb doit se trouver en 4<sup>ème</sup> position le numéro de l'orbitale compté dans l'ordre sous le mot clef "atom".

Sous les paramètres Par\_shift et Par\_weight doit se trouver en 4<sup>ème</sup> position, le numéro de fichier où s'applique le paramètre.

Par exemple pour simuler un échange de charge entre 2 atomes (titane et oxygène), il faudra écrire :

### **Atom**

- 22 3 2 2. → orbitale 3d du titane initialement peuplée avec 2 électrons  
8 2 1 4. → orbitale 2p de l'oxygène initialement peuplée avec 4 électrons

### **Parameter**

#### **Par\_poporb**

2. 0. 3 1 → La première orbitale sous "Atom" est la 3d du titane.

#### **Par\_poporb**

4. 6. 3 2 → La deuxième orbitale sous "Atom" est la 4p de l'oxygène.

Par défaut les distances métriques sont calculées sur toute la gamme d'énergie intersection entre les gammes d'énergie expérimentale et théorique. Il est cependant possible de couper les parties à basse ou haute énergie par les mots clefs :

### **Emin**

- 10 → Energie minimum pour tous les spectres

### **Emax**

100. → Energie maximum pour tous les spectres

Il est possible d'avoir des valeurs différentes pour chaque spectre :

### **Emin**

- 10. -5. -20. -20. → Energie minimum pour chaque spectre

### **Emax**

45. 100. 100. 100. → Energie maximum pour chaque spectre

Si l'énergie des spectres expérimentaux est en keV et non pas en eV, il suffit de mettre le mot clef :

### **Kev**

Quand il y a plusieurs spectres à comparer simultanément, il faut que dans le calcul, ils se trouvent dans le même fichier de sortie. Il faut alors spécifier la colonne qui contient le spectre calculé et l'associer au bon fichier expérimental. Ceci est fait en ajoutant une ligne après chaque nom de fichier expérimental qui contiendra le numéro de la colonne. S'il y a 2 nombres, le premier est le numéro de la colonne du fichier expérimental, le second le numéro de colonne du fichier contenant le calcul. S'il n'y a aucun nombre, cela sous entend que les spectres expérimentaux et théoriques sont en deuxième colonne, la première étant l'énergie. Exemple :

### **Experiment**

- Nom\_exp\_1.txt → Mot clef  
2 → Nom du fichier contenant le 1<sup>er</sup> spectre expérimental  
2 → Numéro de la colonne du fichier de sortie du calcul correspondant  
Nom\_exp\_2.txt → Nom du fichier contenant le 2<sup>ème</sup> spectre expérimental  
3 → Numéro de la colonne du fichier de sortie du calcul correspondant

*Nom\_exp\_2.txt* → Nom du fichier contenant le 3<sup>ème</sup> spectre expérimental  
4 3 → Numéro des colonnes du fichier expérimental *Nom\_exp\_2* puis du  
fichier contenant le calcul

Par défaut, trois facteurs de confiance sont utilisés. Un quatrième « Rxg » peut-être aussi calculé. Il est identique à Rx mais avec un unique facteur de normalisation entre expérience et calcul. Dans le cas où il n'y a qu'un spectre, Rxg devient équivalent à Rx. Pour utiliser ce facteur de confiance, mettre le mot clef :

***Rxg***

## F- Extraction des Scans et Spectres DAFS

Quand on réalise un calcul DAFS avec dépendance azimutale (scan), le fichier de sortie après convolution contient pour chaque réflexion demandée les intensités à tous les angles azimutaux et toutes les énergies. Il est généralement demandé d'extraire de ce très gros fichier des spectres à des azimuts donnés ou des courbes en fonction de l'angle azimutal à des énergies données. Ce module sert à ceci et contient typiquement les entrées suivantes :

*!Indata file for FDMNES, Selection part*

*Selec\_inp* → mot clef pour le nom du fichier d'entrée (sortie de convolution)  
*xanout/fe3o4/2008\_bland/cc\_1221\_1221\_orig\_1m10\_scan\_conv.txt*

*Selec\_out* → mot clef pour le nom du fichier de sortie  
*xanout/test/fe3o4\_scan\_selec\_conv.txt*

*Energy* → mot clef pour l'énergie sélection pour le scan  
 4. → valeur de cette énergie en eV.

*Reflection* → Mot clef pour la sélection des réflexions  
 2 5 6 9 → numéro de ces réflexions

*Azimuth* → mot clef pour la sélection des angles azimutaux

*End*

S'il n'y a rien sous le mot clef "*Azimuth*", c'est un scan azimutal qui sera extrait à l'énergie donnée sous le mot clef "*Energy*". Au contraire si aucun nombre n'est donné sous le mot clef "*Energy*" c'est le spectre qui sera extrait à l'azimut donné sous le mot clef "*Azimuth*".

Il est possible d'avoir plusieurs réflexions à une énergie (ou une azimut). Il est aussi possible d'avoir plusieurs énergies pour une seule réflexion ou plusieurs angles azimutal pour une seule réflexion :

*Energy*  
 4 7.5 → Energies sélectionnées pour les scans

*Reflection*  
 2 → réflexion numéro 2 sélectionnée

*Azimuth* → Pas d'azimut donné, on obtient des scans

ou :

*Energy* → Pas d'énergie donnée, on obtient des spectres

*Reflection*  
 2 → réflexion numéro 2 sélectionnée

*Azimuth*  
30. 60. 90.    → Azimut sélectionné

## F- Fichier nesparam.inc

Ce fichier contient la dimension de tableaux utilisés dans le programme fdmnes. Il est introduit dans chaque sous-programme par l'instruction "include". Si une des dimensions est dépassée au cours d'un calcul, un message d'erreur est affiché, avec le nom du paramètre à augmenter.

Fichier nesparam.inc :

*! File containing the table dimensions of the fdmnes program.  
! When these dimensions are modified, the program must be compiled again.*

*! Dimensions which can be modified:*

*parameter( nlfm = 52 ) ! Max number of (l,m) for the selection rules*

*! Dimensions which cannot be modified:*

*parameter( nnlm = 34 ) ! Max number of orbitals in the excited atom*

*parameter( nopsm = 64 ) ! Number of symmetry operation*

*parameter( nrepm = 12 ) ! Max number of representation*

*parameter( nslapwm = 48 ) ! Max number of symmetry matrix for the FLAPW data*

*! Constants*

*complex(kind=8) img*

*parameter( img = ( 0.\_8, 1.\_8 ) )*

*parameter( bohr = 0.529177249\_8 )*

*parameter( pi = 3.1415926535897932384\_8 )*

*parameter( quatre\_pi = 4 \* pi )*

*parameter( rydb = 13.605698\_8 )*

*parameter( eps4 = 1.e-4\_8 )*

*parameter( eps6 = 1.e-6\_8 )*

*parameter( eps10 = 1.e-10\_8 )*

*parameter( epspos = 1.e-4\_8 ) ! precision on the atom and point positions*







L'atome absorbeur (de type 1) doit contenir une colonne en plus contenant la fonction d'onde initiale (par exemple 1s pour un seuil K) avant absorption du photon :

*fer excite neutre E01 (3d7, 4s2)*

<i>Orbitale</i>	<i>n</i>	<i>l</i>	<i>j</i>	<i>Popul.</i>	<i>Energie</i>
1S	1.0	0.0	0.0	1.000	-7204.473
2S	2.0	0.0	0.0	2.000	-859.982
2P	2.0	1.0	0.0	6.000	-763.986
3S	3.0	0.0	0.0	2.000	-96.485
3P	3.0	1.0	0.0	6.000	-64.835
3D	3.0	2.0	0.0	7.000	-9.151
4S	4.0	0.0	0.0	2.000	-5.544

NUCLEAR CHARGE= 26.000000

INTEGRAL OF CHARGE DENSITY= 26.000000

-----  
 26 17.00 2 3 2 7.000 4 0 2.000  
 600

<i>r (A)</i>	<i>rho (ua-3)</i>	<i>psi(3D)</i>	<i>psi(4S)</i>	<i>pssi</i>
0.00016112638	6572.94900	0.0000000052	0.0023377680	0.0784658600
0.00016413798	6571.00800	0.0000000055	0.0023811100	0.0799206300
0.00016720588	6569.02300	0.0000000058	0.0024252490	0.0814021800
0.00017033115	6567.00900	0.0000000061	0.0024701990	0.0829109400

**Liste des mots clefs de *fdmnes***

Absorber	16	Extract	32
Adimp	39	Extractsym	33
Allsite	34	Filout	12
Ang_spin	23	Flapw	34
Atom	16	Flapw_psi	34
Axe_spin	23	Forbidden	45
Azimuth	51	Fprime	45
Base_spin	36	Fprime_atom	45
Basecomp	37	Gamma_fix	43
Biology	25	Gamma_hole	43
Calculation	42	Gamma_max	44
Cartesian	33	Gaussian	45
Centre	30	Gen_shift	47
Check	36	Green	18
Check_all	36	Hedin	36
Check_coabs	36	Iord	39
Check_conv	44	Jump	35
Check_mat	36	Kev	49
Check_pot	36	Ldipimp	38
Check_sph	36	Length_line	42
Chemin	33	Length_word	41
Chlibre	28	Lmax	40
Clementi	26	Lmaxfree	40
Comment	35	Lmaxso	40
Conv_out	43	Lminus1	30
Convolution	44	Lplus1	30
Crystal	14	Lquaimp	38
Dafs	19	Magnetism	21
Density	31	Metric_out	47
Dec	43	Molecule	14
Delta_E_conv	25	Muffintin	39
Dilatorb	27	N_self	24
Directory	43	No_check	37
Dpos	32	No_Fermi	24
Ecent	44	No_res_mag	35
Edge	18	No_res_mom	35
Efermi	43	Nocut	45
Eimag	29	Noncentre	30
Elarg	44	Nondipole	18
Emax	49	Nonexc	39
Emin	49	Noninterf	18
Endjump	35	Nonoctupole	18
Energpho	17	Nonquadrupole	18
Energy	51	Nonrelat	22
Epsii	33	Normaltau	39
Estart	45	Norman	40
Estatlie	39	Octupole	18
Experiment	47	Overad	32

Overlap	41	SCF	24
P_self	24	SCF_exc	25
Parameter	47	SCF_non_exc	25
Perdew	28	Seah	44
Photoemission	46	Selec_inp	51
Polarize	18	Selec_out	51
Quadrupole	18	Screening	27
R_self	24	Self_absorption	21
Range	17	Spgroup	15
Rangel	17	Sphere_all	32
Raydem	40	Spherical	31
Radius	14	Spinorbite	22
Rchimp	41	Supermuf	41
Reflection	51	Sym	36
Relativism	23	Symsite	37
Rmtimp	41	Table	44
Rmt	39	Thomson	46
Rmtv0	41	Trace	30
Rotsup	35	V0imp	28
Rpotmax	29	Vmax	29
Rxg	50	Xalpha	28
Rxs	19	Xan_atom	35
Rydberg	30	Zero_azim	21
S0_2	48		
Scan	43		