

**Documentation technique pour le  
module CFIE - EFIE  
N. Bartoli  
CERFACS REPORT TR/EMC/04/116**



---

# Documentation technique pour le module de couplage CFIE -EFIE dans le code CESC-FMM

---

novembre 2004

Ce document constitue une documentation technique pour utiliser le module CFIE - EFIE dans le code CESC-FMM. Des exemples de validation seront proposés pour utiliser ce module.

Equipe Electromagnétisme CERFACS  
N. Bartoli [bartoli@cerfacs.fr](mailto:bartoli@cerfacs.fr)

---



# Table des matières

<b>1</b>	<b>Introduction</b>	<b>1</b>
<b>2</b>	<b>Fichier de maillage</b>	<b>1</b>
<b>3</b>	<b>Fichier d'entrée CESC.dat</b>	<b>2</b>
<b>4</b>	<b>Le nouveau module</b>	<b>4</b>
<b>5</b>	<b>Exemple des 3 sphères</b>	<b>4</b>
5.1	Définition des paramètres . . . . .	4
5.2	La résolution LU . . . . .	6
5.3	La résolution GMRES . . . . .	6
5.3.1	Le calcul du préconditionneur . . . . .	6
5.3.2	Le processus itératif . . . . .	9
<b>6</b>	<b>Exemple du petit satellite</b>	<b>13</b>
6.1	Fichier de maillage et fichier de données . . . . .	13
6.2	La résolution LU . . . . .	16
6.3	La résolution GMRES . . . . .	16



# 1 Introduction

La méthode de couplage des formulations CFIE -EFIE a été détaillée dans un précédent rapport [1]. Il s'agit ici de décrire la procédure d'utilisation du code de calcul et notamment du module de couplage qui a été développé dans le code CESC-FMM.

## 2 Fichier de maillage

Comme pour le code généraliste CESC ou le code multipôle CESC-FMM, la génération du fichier de maillage se fait à l'aide de `easymesh`. Dans la définition du fichier `.easy`, il faut préciser les parties du maillage où l'on souhaite faire une CFIE et celles où l'on souhaite faire une EFIE. Par convention,

- la marque 1 sera donnée pour la CFIE,
- la marque 2 sera donnée pour la EFIE.

On donne ci-dessous le contenu du fichier `3spheres.easy` où sur la première sphère (avec 120 degrés de liberté) sera faite une CFIE, sur la deuxième et la troisième sphère (avec 120 degrés de liberté chacune) sera faite une EFIE.

```
on commence par mailler la premiere sphere (N=2 donc 120 ddls)
##BEGIN
    ##SPHERE
    1.0 2
    ##TITLE
    1ere sphere metallique
    ##MARK
    1
##END
on rajoute la 2eme sphere metallique (N=2 donc 120 ddls) translatee x>0
##BEGIN
    ##SPHERE
    1.0 3
    ##TITLE
    2eme sphere metallique
    ##MARK
    2
    ##TRANSLATION
```

```

        3.0 0.0 0.0
##END
on rajoute la 3eme sphere metallique (N=2 donc 120 ddls) translatee x<0
##BEGIN
    ##SPHERE
    1.0 2
    ##TITLE
    3eme sphere metallique
    ##MARK
    2
    ##TRANSLATION
    -3.0 0.0 0.0
##END

```

Le système se compose donc de trois sphères : une centrée à l'origine et les deux autres sont traduites respectivement de 3 et -3 suivant l'axe des  $x$ .

### 3 Fichier d'entrée CESC.dat

Pour utiliser le couplage CFIE - EFIE, il faut activer la clé

```

#EQUATION_TYPE
CFIE-EFIE

```

Il y a alors deux possibilités :

- former la matrice avec les 4 blocs dus au couplage, former le second membre associé et utiliser une résolution directe de type LU,
- utiliser un complément de Schur pour réduire le système à la détermination du courant sur la partie CFIE et utiliser un algorithme GMRES pour la résolution. Pour former le produit matrice-vecteur à chaque itération GMRES, l'algorithme FMM sera utilisé.

**Remarque 3.1** *Si la résolution LU est choisie, la matrice à inverser sera de taille égale à la somme des degrés de liberté CFIE et des degrés de liberté EFIE, soit  $(120 + 120 + 120) \times (120 + 120 + 120)$  dans l'exemple des trois sphères.*

*Si la résolution GMRES est choisie, le système va être réduit (après un complément de Schur) avec une matrice de taille égale au nombre de degrés de*

liberté CFIE, soit  $120 \times 120$  dans l'exemple des trois sphères. De plus, le calcul est accéléré avec l'utilisation de l'algorithme FMM. Le nombre d'itérations peut être largement réduit si un préconditionneur est utilisé.

C'est la clé #INVERSION qui va permettre de faire ce choix :

```
#INVERSION
'FULL'
```

ou

```
#INVERSION
'BGMRES'
```

Si la méthode BGMRES (pour Block GMRES) est choisie, il faut remplir les paramètres de la méthode avec la clé #GMRES (comme pour les formulations classiques).

```
#GMRES
100
1
30
1.e-4
```

Il est possible de préconditionner l'algorithme GMRES par un SPAI. Le préconditionneur est formé uniquement sur la partie CFIE du système. Il faut donc le calculer à partir d'un maillage qui ne contient que les parties CFIE (marque 1 dans le fichier .easy).

**Remarque 3.2** *Si on reprend l'exemple des trois sphères, le préconditionneur va être formé sur le maillage constitué uniquement de la sphère avec 120 degrés de liberté. Il faut donc modifier le nom de la géométrie #INPUTFILE dans le fichier CESC.dat.*

Une fois que le préconditionneur SPAI est stocké (différents fichiers sous le répertoire prec), il est possible de préciser son nom avec la clé #PRECNAME. Cette option permet d'avoir un nom de préconditionneur différent du fichier de géométrie donné par la clé #INPUTFILE.

```
#PRECNAME
1sphereCFIE
```

La clé #PRECNAME est optionnelle. Si elle n'existe pas, le nom du préconditionneur est basé sur la clé #INPUTFILE.

## 4 Le nouveau module

Dans le répertoire contenant les sources du code CESC-FMM, nous avons créé le sous-répertoire `couple` qui contient :

- un programme principal : `pcesc_couple.f90`
- un module contenant toutes les routines créées pour le couplage : `mod_couple.f90`
- le fichier `makefile` qui permet de créer l'exécutable `pcesc_couple_exe` (version parallèle) ou `cesc_couple_exe` (version séquentielle). Précisons que le fichier d'entrée `CEsc.dat` est le même que pour le code CESC-FMM, seule la clé `#EQUATION_TYPE` permet de préciser la formulation choisie : `CFIE` , `EFIE` ou `CFIE -EFIE`. Concernant les fichiers de sortie (courant et ser), ce sont les mêmes sorties que pour les codes `npcesc` et `pcesc_ites_exe`.

## 5 Exemple des 3 sphères

### 5.1 Définition des paramètres

Le maillage et la connectique ont été générés : le fichier `3spheres.Geomd` est créé. Le fichier `CEsc_3spheres_LU.dat` est détaillé ci-dessous.

```

=====INPUTFILE=====
Name of the input geometry file :
the file name.Geom must exist
#INPUTFILE
3spheres
=====OUTPUTFILE=====
Name of the output file
#OUTPUTFILE
3spheres

=====WAVENUMBER=====
<Number-of-wave-number> following by the list of wave number.
<list-of-wave-number>
if((Number-of-wave-number)<0) then read the file : konde.dat
#WAVENUMBER
1
2

```

```
=====#EQUATION=====
```

The type of equation to be solved

you must give

the type of equation

'MASS' 'WEDGE' 'EFIE' 'CFIE' 'MFIE' 'GENE' or 'CFIE-EFIE'

if 'CFIE' you must give alpha\_cfie

if 'GENE' you must give the 5 numbers :

c\_mass c\_wedge c\_simple c\_double c\_double\_wedge

if 'CFIE-EFIE' you must "mark" the mesh and give alpha\_cfie

CFIE=(1-alpha)\*MFIE + alpha\*EFIE

alpha = 1 =====> EFIE

alpha = 0 =====> MFIE

0 < alpha < 1 =====> CFIE ( alpha=0.2 )

#EQUATION\_TYPE

CFIE-EFIE

0.2

```
=====#NPG_INTGS of the RIGHT HAND SIDE=====
```

It is the number of Gauss points used on each triangle

to make the numerical integration on the obstacle.

It is used to get the second term

#NPG\_INTGS

28

```
=====#INCIDENTFIELD=====
```

#DIPOLE\_INCIDENTFIELD

1

1 0.0 0.0 1.0 0.0 0. 1.1 0

```
=====#INVERSION=====
```

'NONE' or 'GMRES' or 'FGMRES'

or 'FULL'(pour faire un LU sur la matrice pleine)

or 'BGMRES' (GMRES apres une decomposition par blocs avec CFIE-EFIE)

#INVERSION

'FULL'

```
=====#BISTATIC=====
#BISTATIC
1
180    0.0    180.0
1    0.0    0.0
```

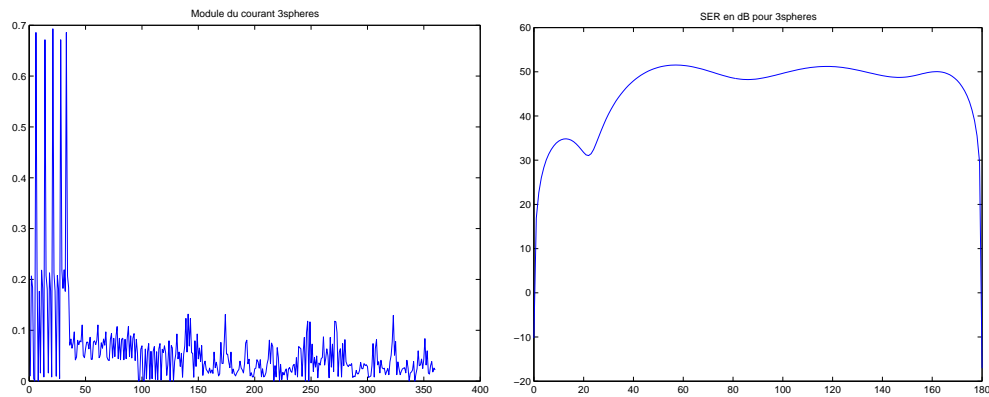
## 5.2 La résolution LU

On lance l'exécution "classique" en parallèle (ou en séquentiel) :

```
mpirun -np 4 bin/pcesc_ites_exe -dCESC_3spheres_LU.dat -gGeomd
```

ou encore l'exécutable lié au nouveau module de couplage :

```
mpirun -np 4 bin/pcesc_couple_exe -dCESC_3spheres_LU.dat -gGeomd
```



(a) Module du courant

(b) SER

FIG. 1 – Courant et SER dans l'exemple 3spheres.

## 5.3 La résolution GMRES

### 5.3.1 Le calcul du préconditionneur

On définit une géométrie constituée d'une seule sphère avec 120 degrés de liberté : fichier `1sphereCFIE_120.easy`

```

##BEGIN
  ##SPHERE
  1.0 2
  ##TITLE
  1ere sphere metallique CFIE
  ##MARK
  1
##END

```

On lance ensuite le préconditionneur de manière classique

```
mpirun -np 4 bin/pcesc_prec_exe -dCESC_3spheres_prec.dat -gGeomd
```

Le fichier CESC\_3spheres\_prec.dat contient les informations suivantes :

```

=====#INPUTFILE=====
Name of the input geometry file :
the file name.Geom must exist
#INPUTFILE
1sphereCFIE_120
=====#OUTPUTFILE=====
Name of the output file
#OUTPUTFILE
1sphereCFIE_120

=====#WAVENUMBER=====
<Number-of-wave-number> following by the list of wave number.
<list-of-wave-number>
if((Number-of-wave-number)<0) then read the file : konde.dat
#WAVENUMBER
1
2

=====#EQUATION=====
The type of equation to be solved
you must give
  the type of equation
    'MASS' 'WEDGE' 'EFIE' 'CFIE' 'MFIE' 'GENE' or 'CFIE-EFIE'
    if 'CFIE' you must give alpha_cfie

```

```

        if 'GENE' you must give the 5 numbers :
        c_mass c_wedge c_simple c_double c_double_wedge
        if 'CFIE-EFIE' you must "mark" the mesh and give alpha_cfie
CFIE=(1-alpha)*MFIE + alpha*EFIE
alpha = 1      =====> EFIE
alpha = 0      =====> MFIE
0 < alpha < 1 =====> CFIE ( alpha=0.2 )
#EQUATION_TYPE
CFIE
0.2

=====#INVERSION=====
'NONE' or 'GMRES' or 'FGMRES'
or 'FULL'(pour faire un LU sur la matrice pleine)
or 'BGMRES' (GMRES apres une decomposition par blocs avec CFIE-EFIE)
#INVERSION
'GMRES'

=====#PREC=====
The preconditionner is assumed to be constructed
and the data for it is in 2 files. Those 2 files
can be formatted (val=2) or not (val = 1).
If you don't want to precondition the system, val=0.
2) type of preconditioning
3) a size of buffer
PREC
0
box
1000 ! buffer sizes

```

**Remarque 5.1** *On notera que le type de l'équation pour le calcul du préconditionneur est "CFIE".*

Les fichiers suivants sont créés dans le directory `prec` :

```

1sphereCFIE_120CFIEC0000.permut
1sphereCFIE_120CFIEC0000.indexprec
1sphereCFIE_120CFIEC0000.columnprec
1sphereCFIE_120CFIEC0000.valprec

```

### 5.3.2 Le processus itératif

Le fichier de donnée CESC\_3spheres\_GMRES.dat est donné ci-dessous.

```

=====INPUTFILE=====
Name of the input geometry file :
the file name.Geom must exist
#INPUTFILE
3spheres
=====OUTPUTFILE=====
Name of the output file
#OUTPUTFILE
3spheres

=====WAVENUMBER=====
<Number-of-wave-number> following by the list of wave number.
<list-of-wave-number>
if((Number-of-wave-number)<0) then read the file : konde.dat
#WAVENUMBER
1
2

=====EQUATION=====
The type of equation to be solved
you must give
  the type of equation
    'MASS' 'WEDGE' 'EFIE' 'CFIE' 'MFIE' 'GENE' or 'CFIE-EFIE'
    if 'CFIE' you must give alpha_cfie
    if 'GENE' you must give the 5 numbers :
      c_mass c_wedge c_simple c_double c_double_wedge
    if 'CFIE-EFIE' you must "mark" the mesh and give alpha_cfie
CFIE=(1-alpha)*MFIE + alpha*EFIE
alpha = 1      =====> EFIE
alpha = 0      =====> MFIE
0 < alpha < 1 =====> CFIE ( alpha=0.2 )
#EQUATION_TYPE
CFIE-EFIE
0.2

```

=====#NPG\_INTGS of the RIGHT HAND SIDE=====

It is the number of Gauss points used on each triangle  
to make the numerical integration on the obstacle.

It is used to get the second term

#NPG\_INTGS

28

=====#INCIDENTFIELD=====

#DIPOLE\_INCIDENTFIELD

1

1 0.0 0.0 1.0 0.0 0. 1.1 0

=====#BOXSPLIT=====

Strategy for the splitting in boxes (automatic or given)

you must give

given : 1) the number of levels for the splitting in boxes

2) no

3) the lower corner of the large box and its size (4 numbers)

automatic : 1) the number of levels for the splitting in boxes

2) no

Caution: The number of levels must be greater or equal to 3

#BOXSPLIT

automatic !given !automatic ! automatic or given

3 ! levelnumber

no ! try to modify the center of the boxes

-1.2 -1.2 -1.2 2.4 !x-, y-, z-, size ! if the option is given

=====#INVERSION=====

'NONE' or 'GMRES' or 'FGMRES'

or 'FULL'(pour faire un LU sur la matrice pleine)

or 'BGMRES' (GMRES apres une decomposition par blocs avec CFIE-EFIE)

#INVERSION

'BGMRES'

=====#PRECNAME=====

The name where to read the preconditioner if this name is different  
from #INPUTFILE

```

#PRECNAME
1sphereCFIE_120

=====#GMRES=====
GMRES inversion requires
  1) an integer          N --> the maximum of iterations
  2) an integer          1 --> write gmres diagnostic in some file
                        0 --> not coded yet
  3) an integer          M --> restart parameter
  4) a real              eps-> the backward residual norm to
                        achieve

#GMRES
100
1
30
0.10E-04

=====#BISTATIC=====
#BISTATIC
1
180    0.0    180.0
1    0.0    0.0

```

**Remarque 5.2** *Le champ incident est donné par un dipôle. On choisit d'imposer 28 points de Gauss pour le calcul du second membre avec la clé #NPG\_INTGS pour avoir suffisamment de précision.*

On notera les clés importantes :

- #BOXSPLIT qui permet de choisir le nombre de niveaux FMM pour effectuer le produit matrice-vecteur sur la matrice provenant du couplage CFIE-CFIE, c'est à dire de la sphère 1 sur elle-même dans notre exemple. Cette clé a une valeur par défaut si elle n'est pas donnée.
- #INVERSION : BGMRES pour préciser que c'est un algorithme Block-GMRES. Les paramètres de l'algorithme sont donnés avec la clé #GMRES (restart, résidu...)
- #PRECNAME qui permet d'aller chercher les fichiers du préconditionneur associé.

L'algorithme BGMRES préconditionné converge en 10 itérations pour un résidu en  $10^{-5}$ . Si on ne veut pas utiliser de préconditionneur, il suffit d'activer la clé #PREC avec l'option 0 :

```
=====#PREC=====
#PREC
0
box
1000 ! buffer sizes
```

Sans préconditionneur, la convergence nécessite alors 12 itérations pour atteindre un résidu en  $10^{-5}$ .

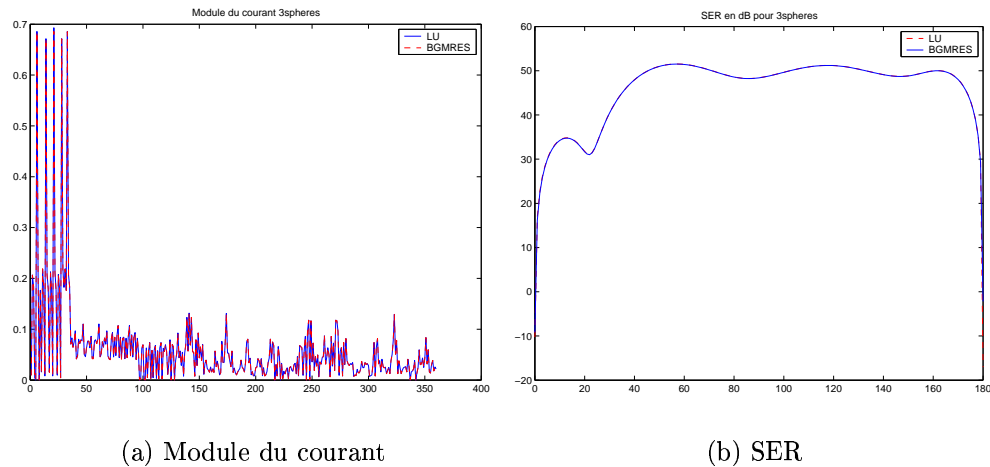


FIG. 2 – Courant et SER dans le cas 3spheres.

Les erreurs relatives entre la formulation LU et la formulation BGMRES sont de 0.66% sur le courant et de 0.46% sur le champ lointain. Pour valider nos résultats, on peut comparer avec une formulation EFIE sur l'ensemble des 3 sphères : il faut alors 13 ou 49 itérations GMRES avec ou sans préconditionneur pour un résidu en  $10^{-5}$ . Les diagrammes de rayonnement sont comparées sur la figure 3 en fonction de la formulation choisie CFIE -EFIE ou EFIE. Une plus grande concordance des courbes serait obtenue en prenant plus de points pour le maillage des sphères car ici nous avons seulement 5 points par longueur d'onde.

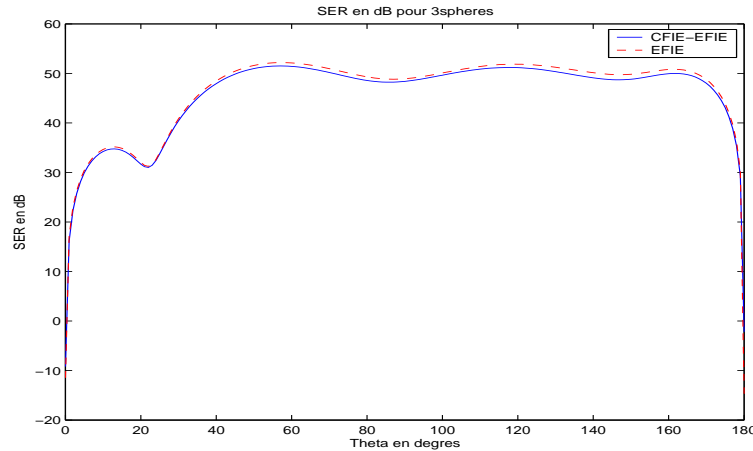


FIG. 3 – Comparaison des diagrammes de rayonnement en fonction de la formulation.

## 6 Exemple du petit satellite

### 6.1 Fichier de maillage et fichier de données

Le deuxième exemple que nous considérons est un petit satellite composé d'un cube métallique centré à l'origine, entouré de deux plaques métalliques. Le couplage CFIE -EFIE consiste à utiliser une formulation CFIE sur la surface fermée (le cube) et une formulation EFIE sur les surfaces ouvertes (les deux plaques). Le nombre de degrés de liberté est de 1610 dont 576 sur le cube métallique. Le fichier `sat3reduit.easy` est donné ci-dessous.

```
1ere etape du satellite
Boite centree par default en (0,0,0)
lengthX lengthY lengthZ
division en X en Y en Z
##BEGIN
  ##BOX
  1.0  1.0  1.0
  5   5   5
  ##TITLE
  pave metallique  traite en CFIE
  ##MARK
```

```

1
##END
2eme etape du satellite : on rajoute une plaque translatee en y>0
##BEGIN
  ##PLAQUE
  1.0  6.0  5 30
  ##TITLE
  premiere plaque metallique traitee en EFIE
  ##TRANSLATION
  0.0  3.7 0.0  0
  ##MARK
  2
##END
3eme etape du satellite : on rajoute une 2eme plaque translatee en y<0
##BEGIN
  ##PLAQUE
  1.0  6.0  5 30
  ##TITLE
  deuxieme plaque metallique traitee en EFIE
  ##TRANSLATION
  0.0  -3.7 0.0  0
  ##MARK
  2
##END

```

Les paramètres de la simulation sont précisés dans le fichier `CESC_sat3reduit_doc.dat`. Le nombre d'onde est égal à 3, ce qui assure un maillage avec 10 points par longueur d'onde. L'excitation est donnée par un dipôle placé au-dessus du cube. Pour avoir assez de précision sur le second membre, on impose un calcul avec 28 points de Gauss sur ce dernier.

```

=====#INPUTFILE=====
Name of the input geometry file :
the file name.Geom must exist
#INPUTFILE
sat3reduit

=====#OUTPUTFILE=====
Name of the output file

```

```
#OUTPUTFILE
sat3reduit
```

```
===== #WAVENUMBER =====
<Number-of-wave-number> following by the list of wave number.
<list-of-wave-number>
if((Number-of-wave-number)<0) then read the file : konde.dat
#WAVENUMBER
1
3
```

```
===== #EQUATION =====
The type of equation to be solved
you must give
  the type of equation
    'MASS' 'WEDGE' 'EFIE' 'CFIE' 'MFIE' 'GENE' or 'CFIE-EFIE'
    if 'CFIE' you must give alpha_cfie
    if 'GENE' you must give the 5 numbers :
      c_mass c_wedge c_simple c_double c_double_wedge
    if 'CFIE-EFIE' you must "mark" the mesh and give alpha_cfie
CFIE=(1-alpha)*MFIE + alpha*EFIE
alpha = 1      =====> EFIE
alpha = 0      =====> MFIE
0 < alpha < 1 =====> CFIE ( alpha=0.2 )
#EQUATION_TYPE
CFIE-EFIE
0.2
```

```
===== #NPG_INTGS of the RIGHT HAND SIDE =====
It is the number of Gauss points used on each triangle
to make the numerical integration on the obstacle.
It is used to get the second term
#NPG_INTGS
28
```

```
===== #INCIDENTFIELD =====
#DIPOLE_INCIDENTFIELD
1
```

```
1 0.0 0.0 1.0 0. 0. 0.6 0
```

## 6.2 La résolution LU

Comme pour l'exemple précédent, il suffit de lancer le code classique avec les options :

```
#EQUATION_TYPE
CFIE-EFIE
0.2
#INVERSION
'FULL'
```

La matrice du système a une dimension :  $1610 \times 1610$ .

## 6.3 La résolution GMRES

Pour la résolution GMRES avec complément de Schur, on rajoute les clés suivantes :

```
#BOXSPLIT
automatic !given !automatic      ! automatic or given
3      ! levelnumber
no      ! try to modify the center of the boxes
=====#INVERSION=====
#INVERSION
'BGMRES'
=====#GMRES=====
#GMRES
100
1
30
0.10E-03
```

**Remarque 6.1** *Nous avons imposé 3 niveaux pour la décomposition FMM car par défaut, l'algorithme choisit deux niveaux, ce qui ne permet pas de faire de la FMM.*

Après utilisation du complément de Schur, le système a une taille réduite de  $576 \times 576$ , où 576 correspond au nombre de degrés de liberté du cube métallique.

Sans préconditionneur, l'algorithme converge en 17 itérations avec un résidu de  $10^{-4}$ . Pour utiliser l'algorithme GMRES avec un préconditionneur, il faut former le préconditionneur CFIE relatif au cube métallique. Le fichier `sat3reduit_CFIEonly` contient donc uniquement l'élément `##BOX`.

On ne maille que la partie en CFIE pour le calcul du preconditionneur  
Boite centree par default en (0,0,0)

```
lengthX lengthY lengthZ
division en X en Y en Z
##BEGIN
    ##BOX
    1.0  1.0  1.0
    5    5    5
    ##TITLE
    pave metallique  traite en CFIE
    ##MARK
    1
##END
```

Une fois que les fichiers du préconditionneur sont formés, on lance l'algorithme GMRES en rajoutant la clé

```
#PRECNAME
sat3reduit_CFIEonly
```

L'algorithme converge à présent en 9 itérations toujours pour un résidu en  $10^{-4}$ .

Les erreurs sur le courant et le champ lointain par rapport à une résolution LU sont négligeables : 0.8% sur le courant et 0.38% sur le champ lointain.

Si on compare avec une formulation EFIE sur l'ensemble du satellite, la convergence est beaucoup plus lente (même résidu fixé à  $10^{-4}$ ) : 223 itérations sans préconditionneur et 21 itérations avec. Par défaut, le nombre de niveaux est fixé à 6.

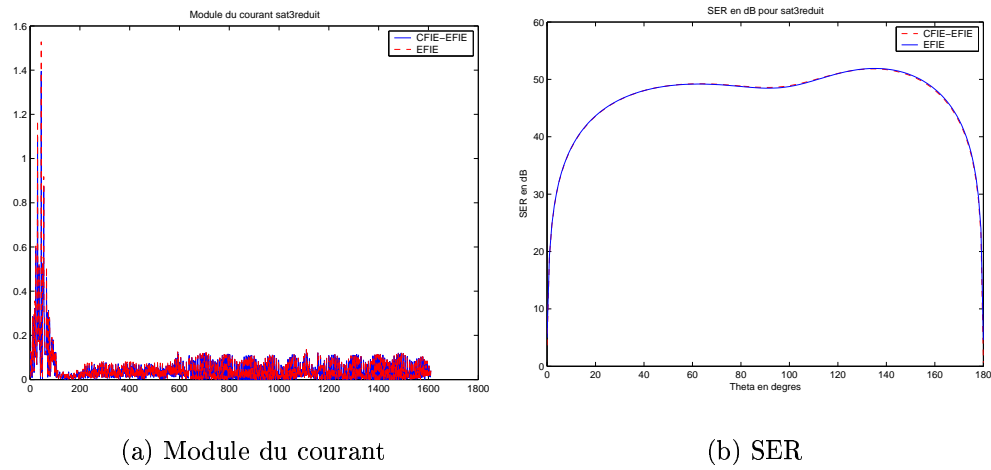


FIG. 4 – Courant et SER en fonction de la formulation choisie.

Comme le montre la figure 4, l'erreur relative entre la formulation CFIE - EFIE et la formulation EFIE est relativement faible :

- 10.28% sur le courant
- 2.23% sur le champ lointain.

**Table des figures**

1	Courant et SER dans l'exemple 3spheres. . . . .	6
2	Courant et SER dans le cas 3spheres. . . . .	12
3	Comparaison des diagrammes de rayonnement en fonction de la formulation. . . . .	13
4	Courant et SER en fonction de la formulation choisie. . . . .	18

## Références

- [1] Nathalie Bartoli. Etude du couplage CFIE - EFIE. Contract Report CR/EMC/04/115, CERFACS, Toulouse, France, 2004.