

Guide de l'utilisateur de TEMSI
version 3.0

Christophe GUIFFAUT

Mars 2007

Table des matières

1	Introduction	5
2	Langage script de TEMSI	7
3	Syntaxe du manuel	9
4	La librairie TEMSI	11
5	Les constantes scientifiques	13
6	Milieux	15
6.1	Milieux simples et milieu_fractal <milieu_simple>	15
6.1.1	Rôle et syntaxe	15
6.1.2	Informations complémentaires	23
6.2	Milieux dispersifs, <milieu_dispersif>	25
6.2.1	Rôle et syntaxe	25
6.2.2	Informations complémentaires	29
7	Huygens et Formes d'onde	33
7.1	Surface de Huygens, <surface_huygens>	33
7.1.1	Rôle - syntaxe	33
7.2	Fonctions sources, <fonction_source>	35
7.2.1	Rôle et fonction	35
7.2.2	Informations complémentaires	40

8	Post-traitement - Résultats	49
8.1	Fichier de sortie, <fichier_sortie>	49
8.1.1	Rôle - syntaxe	49
8.2	Intervalles et liste temps-fréquence, <temps_frequence>	51
8.2.1	Rôle - syntaxe	51
8.2.2	Informations complémentaires	53
8.3	Zone angulaire, <zone_angulaire>	55
8.3.1	Rôle - syntaxe	55
8.4	Formats de stockage en fréquence et normalisation en fréquence	57
8.4.1	Format de stockage	57
8.4.2	Normalisation en fréquence	57

Chapitre 1

Introduction

Vous entrez avec ce chapitre dans le vif du sujet. Il est incontournable pour celui qui veut faire ne serait ce que la plus modeste des simulations. Il vous fera peut-être hérisser les poils à cause des possibilités très variées ou faire monter la température pour ceux qui n'en n'ont pas car il faut de la réflexion et de l'attention. Un peu de patience il vous faudra aussi ! Bon, je sais vous êtes pressé mais vous allez démontrer que vous en voulez en lisant la doc. jusqu'à la dernière ligne ! Une concentration importante il vous est demandé afin de retenir un nombre minimum de mots-clés (ils sont nombreux !) et surtout, surtout, de retenir les limites des différentes fonctionnalités (n'allez pas me demandez pourquoi ça ne marche pas alors que c'était garanti car écrit noir sur blanc que vous ne devez pas transgresser telle règle tel que vous l'avez fait. Alors réfléchissez avant de venir voir le spécialiste du moment).

Cependant (pour vous rassurer), passée la première application, vous allez vite comprendre qu'il n'est pas difficile de faire des grosses et complexes simulations mais aussi des grosses conneries ! - un extrême ne va pas sans l'autre - Toujours, une attention importante vous sera demandée pendant l'écriture du script. Passer maître dans l'art d'utiliser ce guide et faire des simulations complexes, vous serez maître des logiciels commerciaux de simulation car vous aurez appris les subtilités qui se cachent derrière leurs automaticités.

Trêves de discours, il ne faut pas s'affoler sur la complexité du script car le langage est très rudimentaire avec un minimum de syntaxe. Ce choix est délibéré afin de palier quelque peu à la richesse des mots-clés. Car, en effet, il y en a beaucoup à cause de la règle suivante :

Toutes les lignes de données utiles sont identifiées par un mot-clé explicite ; explicite, car d'une part écrit en français et d'autre part signifiant précisément les données. On notera que le mot « identifiant » est aussi employé pour désigner le premier mot clé de la ligne.

Voici quelques exemples de lignes de données :

```
nxnynz 100 100 50 # nombre de cellules suivant les directions
                    # x,y et z respectivement
# Deux surfaces de définies : plans xoy inférieure et supérieure
# dont leurs positions et coordonnées sont définies
# par 6 valeurs entières en nombre de cellules :
# imin imax jmin jmax kmin kmax (i,j et k pour x,y et z lorsque les valeurs
# sont exprimées en cellules)
surface xoyinf xoysup 10 30 20 50 10 20
```

Vous l'avez remarqué, des lignes commençant par le symbole # se sont glissées entre les deux lignes utiles (utile = données de simulation). Ce sont vos commentaires, ils sont ignorés par le programme. En fin observateur, vous avez déjà compris que les commentaires peuvent être aussi insérés en bout de chaîne utile et même de suite après le dernier caractère utile !

Pour aérer votre script, vous êtes libres aussi de mettre des lignes blanches où bon vous semble. Le caractère « espace » sert à séparer les données. Depuis la version 2.1, les tabulations, les virgules et les point-virgules sont acceptés aussi comme séparateurs de données.

Les données utiles peuvent être de trois types : entier, réel, chaîne de caractères sans blancs ou espaces. Vous pouvez avoir sur une même ligne (après l'identifiant, on se comprend) un nombre important de données et des trois types cités. Ceci est explicité pour chaque cas par la suite.

Si je parle de langage rudimentaire, bien entendu, les lignes de données utiles ne gambadent pas librement dans la nature. Et voici donc une deuxième règle :

Toutes les lignes de données utiles se trouvent obligatoirement au sein d'un bloc de données délimité par une balise de début et une balise de fin.

Un exemple, viiiiite !

```
<volume_calcul # balise de début du bloc 'volume de calcul'
##### deux lignes de données maintenant #####
nxnynz 100 100 50 # déjà vu celle la !
dxdydz 1e-3 1.5e-3 1.5000e-3 # Pas la peine de mettre 3 zéros pour la dernière
                                # données !
volume_calcul> # balise de fin du bloc 'volume de calcul'
```

C'est équivalent à ceci avec les séparateurs virgule et point-virgule :

```
<volume_calcul
  nxnynz 100, 100, 50
  dxdydz 1e-3; 1.5e-3; 1.5000e-3
volume_calcul>
```

Les blocs ? afin de mettre un peu d'ordre ! Le bon ordre est celui qui simplifie les choses. Et si je puis le dire, cette deuxième règle simplifie l'interprétation du script pour le moteur de calcul. En outre, les données se trouvent clairement classifiées, ce qui facilitera leur lecture. Cette simple structuration donne de la souplesse car les blocs peuvent être arrangés (à quelques exceptions toutefois qui seront indiquées clairement par la suite) dans n'importe quel ordre et ceux qui ne sont pas nécessaires n'y sont pas. Si, à priori, il n'y a pas d'ordres dans les blocs, il vaut mieux toutefois respecter une certaine logique dans l'élaboration du script qui est décrite au paragraphe 4.

Chapitre 2

Langage script de TEMSI

Pour l'instant, il n'existe pas d'interface graphique pour décrire une modélisation électromagnétique. Un langage de script très explicite permet à l'utilisateur de définir l'ensemble des données de modélisation grâce à un simple éditeur de texte.

Le langage est très rudimentaire avec un minimum de syntaxe. Ce choix est délibéré afin de palier quelque peu à la richesse des mots-clés. Car, en effet, il y en a beaucoup à cause de la règle suivante :

Toutes les lignes de données utiles sont identifiées par un mot-clé explicite ; explicite, car d'une part écrit en français et d'autre part signifiant précisément les données. On notera que le mot « identifiant » est aussi employé pour désigner le premier mot clé de la ligne.

Voici quelques exemples de lignes de données :

```
nxnynz 100 100 50 # nombre de cellules suivant les directions
                        # x,y et z respectivement
# Deux surfaces de définies : plans xoy inférieure et supérieure
# dont leurs positions et coordonnées sont définies
# par 6 valeurs entières en nombre de cellules :
# imin imax jmin jmax kmin kmax (i,j et k pour x,y et z lorsque les valeurs
# sont exprimées en cellules)
surface xoyinf xoyinf 10 30 20 50 10 20
```

Vous l'avez remarqué, des lignes commençant par le symbole # se sont glissées entre les deux lignes utiles (utile = données de simulation). Ce sont vos commentaires, ils sont ignorés par le programme. En fin observateur, vous avez déjà compris que les commentaires peuvent être aussi insérés en bout de chaîne utile et même de suite après le dernier caractère utile !

Pour aérer votre script, vous êtes libres aussi de mettre des lignes blanches où bon vous semble. Le caractère « espace » sert à séparer les données. Depuis la version 2.1, les tabulations, les virgules et les point-virgules sont acceptés aussi comme séparateurs de données.

Les données utiles peuvent être de trois types : entier, réel, chaîne de caractères sans blancs ou espaces. Vous pouvez avoir sur une même ligne (après l'identifiant, on se comprend) un nombre important de données et des trois types cités. Ceci est explicité pour chaque cas par la suite.

Si je parle de langage rudimentaire, bien entendu, les lignes de données utiles ne gambadent pas librement dans la nature. Et voici donc une deuxième règle :

Toutes les lignes de données utiles se trouve obligatoirement au sein d'un bloc de données délimité par une balise de début et une balise de fin.

Un exemple, viiiiite!

```
<volume_calcul # balise de début du bloc 'volume de calcul'
##### deux lignes de données maintenant #####
nxnynz 100 100 50 # déjà vu celle la!
dxdydz 1e-3 1.5e-3 1.5000e-3 # Pas la peine de mettre 3 zéros pour la dernière
                                # données!
volume_calcul> # balise de fin du bloc 'volume de calcul'
```

C'est équivalent à ceci avec les séparateurs virgule et point-virgule :

```
<volume_calcul
  nxnynz 100, 100, 50
  dxdydz 1e-3; 1.5e-3; 1.5000e-3
volume_calcul>
```

Les blocs ? afin de mettre un peu d'ordre ! Le bon ordre est celui qui simplifie les choses. Et si je puis le dire, cette deuxième règle simplifie l'interprétation du script pour le moteur de calcul. En outre, les données se trouvent clairement classifiées, ce qui facilitera leur lecture. Cette simple structuration donne de la souplesse car les blocs peuvent être arrangés (à quelques exceptions toutefois qui seront indiquées clairement par la suite) dans n'importe quel ordre et ceux qui ne sont pas nécessaires n'y sont pas. Si, à priori, il n'y a pas d'ordres dans les blocs, il vaut mieux toutefois respecter une certaine logique dans l'élaboration du script. Celle-ci est décrite dans le guide de l'utilisateur de TEMSI-FD

Chapitre 3

Syntaxe du manuel

A partir de la section ??, les blocs de données sont décrits un par un. Une syntaxe simple est appliquée lors de la description des lignes de données :

- Les identifiants (début de lignes de données) sont mis en bleu + gras
- Les mots-clés autres que les identifiants de lignes de données sont en couleur magenta
- Les sous-identifiants sont mis en vert + gras. Les sous-identifiants représentent des lignes de données qui sont rattachées à une ligne mère. Les sous-identifiants sont toujours situés juste en dessous de la ligne mère.
- Les trois types de données utiles (entier, réel et chaîne de caractères) sont identifiés par un nom représentant la donnée, précédé par un préfixe :
 - \$I_nomdonnée : '\$I_' veut dire que la donnée désignée par son nom 'nomdonnée' est de type entier.
 - \$R_nomdonnée : '\$R_' veut dire que la donnée désignée par son nom 'nomdonnée' est de type réel.
 - \$C_nomdonnée : '\$C_' veut dire que la donnée désignée par son nom 'nomdonnée' est de type chaîne.
- \$nom : la donnée qui se substitue à 'nom' est de type chaîne. \$nom peut être accolé à un identifiant. Dans ce cas, l'identifiant + \$nom forme un nom complet qui représente la ligne de données et qui peut être utilisé par la suite dans d'autres blocs. Par exemple :

```
IT1 # IT est l'identifiant, '1' le nom accolé.  
# IT1 représente la ligne de données  
IT_complet # IT est l'identifiant, '_complet' le nom accolé.  
# IT_complet représente la ligne de donnée
```


Chapitre 4

La librairie TEMSI

TEMSI est constitué d'un ensemble de modules sources qui sont communs aux solveurs existants soit pour la FDTD, la MTL, Galerkin Discontinu... Des blocs de données sont aussi inclus dans TEMSI. Ils sont amenés à être toujours plus nombreux car de par leur mutualité à tous les solveurs, ils font gagner beaucoup de temps en développement.

La liste des blocs de données de TEMSI est donnée ci-dessous.

1. MILIEUX

BLOC : <milieu_simple>

-> Déclaration et définition de matériaux qui sont non dispersifs (caractérisés par les paramètres électromagnétiques classiques : ε , μ , σ_e et σ_h)

BLOC : <milieu_dispersif>

-> Déclaration et définition de matériaux dispersifs électriques ou magnétiques (caractérisés par les modèles de Debye, de Lorentz ou généralisés et à N pôles)

2. FONCTIONS SOURCES et HUYGENS

Les sources d'excitation possibles sont l'onde plane pour les problèmes de réception et les alimentations locales en tension et en courant. A chaque source est associée une fonction temporelle qui décrit la forme de l'excitation (gaussienne, sinus, ...).

BLOC : <fonction_source>

-> Description de ou des formes d'excitation (gaussienne, sino-gaussienne, dérivée de la gaussienne, ondelette de Rayleigh, sinus, double-exponentielles)

BLOC : <surface_huygens>

-> Définition de surfaces de Huygens. Utile pour le champ lointain.

3. POST-TRAITEMENT : RESULTATS ET FORMAT DU OU DES FICHIERS DE SORTIE

Les résultats désirés sont définis en dernière étape. Les données sont formatées en ASCII. Les blocs <fichier_sortie> et <temps_frequence> doivent être définis avant les autres parce que ces derniers y ont recours.

BLOC : <fichier_sortie>

- > Il permet de décrire le format de stockage des réels et des entiers, de définir l'extension pour tous les fichiers résultats...

BLOC : <temps_frequence>

- > Définition des intervalles de stockage en temps et en fréquence.

BLOC : <zone_angulaire>

- > Définition de zones angulaires en coordonnées sphériques. Utile pour le champ lointain.

Chapitre 5

Les constantes scientifiques

Les constantes scientifiques suivantes sont communes à tous les modules sources de TRIDIMO :

ε_0	=	EPSILON_0	=	8.854187818e-12
μ_0	=	MU_0	=	12.5663706144e-7
π	=	PI	=	3.141592654
c	=	CVIDE	=	299792458.0
η_0	=	ZVIDE	=	376.7303135

Chapitre 6

Milieux

Avant de décrire les structures, il faut définir les différents matériaux mis en jeu dans les blocs `<milieu_simple>` et `<milieu_dispersif>` (excepté pour les conducteurs parfaits qui ont un identifiant prédéfini). Dans ces deux blocs, chaque matériau est identifié par un nom. Les noms de matériaux sont ensuite utilisés dans le bloc `<structure>` pour identifier le milieu de chaque structure définie. En conséquence, un des deux blocs `<milieu_simple>` ou `<milieu_dispersif>` (ou les deux) sera défini avant le bloc `<structure>`.

6.1 Milieux simples et milieu_fractal `<milieu_simple>`

6.1.1 Rôle et syntaxe

Tous les milieux non dispersifs, mais pouvant présenter des pertes par conduction, sont décrits dans ce bloc. En fait, les milieux simples sont ceux qui peuvent être définis par une permittivité relative (ϵ_r), une perméabilité relative (μ_r), une conductivité électrique (σ_e) et une conductivité magnétique (σ_h). Le bloc a pour objectif de déclarer les milieux non dispersifs du volume et de les caractériser électromagnétiquement parlant. En outre, le milieu peut présenter une granulosité sur la permittivité et la conductivité électrique. La granulosité offre une approche plus réaliste pour la modélisation de sols par exemple. L'hétérogénéité est dans ce cas traitée par un modèle fractal proposé par Besse [1].

Syntaxe et signification (identifiants de base)

La description des milieux commence par la déclaration de celui-ci. Elle consiste à donner un nom au milieu défini. Ensuite, ses caractéristiques électromagnétiques sont données en dessous. Il existe deux types de milieu non dispersif. Le premier correspond à la définition classique par les paramètres : ϵ , μ , σ_e et σ_h . Son identifiant est simplement le mot **milieu**. Le second correspond au milieu non dispersif mais hétérogène. L'hétérogénéité du milieu est modélisée par les fractals. Son identifiant est le mot clé **milieu_fractal**. Voici la manière dont les deux types de milieu sont définis :

milieu `$C_nom_milieu`

-> Déclaration d'un milieu. Par défaut le milieu déclaré correspond au vide ($\epsilon_r = \mu_r = 1$; $\sigma_e = \sigma_h = 0$).

nom_milieu : le nom du milieu

Pour chaque milieu déclaré, les propriétés suivantes peuvent être définies en dessous de sa déclaration,

inhibant les valeurs par défaut correspondantes. Toutes les propriétés propres à un milieu apparaissent entre la déclaration de celui-ci et la déclaration du milieu suivant ou du nom de fin de bloc. Les propriétés du milieu sont identifiées par des sous-identifiants dont voici la liste :

epsr \$R_valeur_ε_r

-> Permittivité relative du milieu ($\varepsilon_{r,x} = \varepsilon_{r,y} = \varepsilon_{r,z} = \varepsilon_r$), unité : F/m.

epsrx \$R_valeur_ε_{r,x}

-> Permittivité relative du milieu suivant x seulement, unité : F/m.

epsry \$R_valeur_ε_{r,y}

-> Permittivité relative du milieu suivant y seulement, unité : F/m.

epsrz \$R_valeur_ε_{r,z}

-> Permittivité relative du milieu suivant z seulement, unité : F/m.

mur \$R_valeur_μ_r

-> Perméabilité relative du milieu ($\mu_{r,x} = \mu_{r,y} = \mu_{r,z} = \mu_r$), unité : H/m.

murx \$R_valeur_μ_{r,x}

-> Perméabilité relative du milieu suivant x seulement, unité : H/m.

mury \$R_valeur_μ_{r,y}

-> Perméabilité relative du milieu suivant y seulement, unité : H/m.

murz \$R_valeur_μ_{r,z}

-> Perméabilité relative du milieu suivant z seulement, unité : H/m.

sige \$R_valeur_σ_eT

-> Conductivité électrique du milieu ($\sigma_{e,x} = \sigma_{e,y} = \sigma_{e,z} = \sigma_e$), unité : S/m.

sigex \$R_valeur_σ_{e,x}

-> Conductivité électrique du milieu suivant x, unité : S/m.

sigey \$R_valeur_σ_{e,y}

-> Conductivité électrique du milieu suivant y, unité : S/m.

sigez \$R_valeur_σ_{e,z}

-> Conductivité électrique du milieu suivant z, unité : S/m.

sigh \$R_valeur_σ_h

-> Conductivité magnétique du milieu ($\sigma_{h,x} = \sigma_{h,y} = \sigma_{h,z} = \sigma_h$), unité : ?/m.

sighx \$R_valeur_σ_{h,x}

-> Conductivité magnétique du milieu suivant x, unité : ?/m.

sighy \$R_valeur_σ_{h,y}

-> Conductivité magnétique du milieu suivant y, unité : ?/m.

sighz \$R_valeur_σ_{h,z}

-> Conductivité magnétique du milieu suivant z, unité : ?/m.

milieu_fractal \$C_nom_milieu

-> Déclaration d'un milieu présentant une granulosité de volume décrit par un modèle fractal.

nom_milieu : le nom du milieu fractal

Pour chaque milieu déclaré, les propriétés suivantes doivent être définies en dessous de sa déclaration. Contrairement au type **milieu**, certaines données doivent absolument être fournies avec les milieux fractals. Il s'agit de la graine, de la valeur moyenne et du facteur multiplicatif de l'hétérogénéité. Toutes les propriétés propres à un milieu apparaissent entre la déclaration de celui-ci et la déclaration du milieu suivant ou du nom de fin de bloc. Le milieu peut être granuleux uniquement sur la permittivité (même chose pour la conductivité). Les propriétés du milieu sont identifiées par des sous-identifiants dont voici la liste :

eps_moyen \$R_ε_{r,moyen}

mu_moyen \$R_μ_{r,moyen}

sige_moyen \$R_σ_{e,moyen}

sigh_moyen \$R_σ_{h,moyen}

-> Les valeurs moyennes relatives pour respectivement la permittivité, la perméabilité, la conductivité électrique et la conductivité magnétique. Le milieu fractal ne peut pas présenter d'anisotropie axiale.

eps_graine \$I_eps-graine

sige_graine \$I_sige-graine

-> La graine permet de répéter un tirage aléatoire qui est toujours le même pour une valeur donnée de la graine (voir l'argument *put* de la fonction RANDOM_SEED en Fortran 90). Ainsi, on peut préserver la même granulosité pour la permittivité et la conductivité. La graine est une valeur entière quelconque entre : $-2,147483 \cdot 10^9 \leq \text{graine} \leq +2,147483 \cdot 10^9$. En général, si le milieu est à perte alors la même graine devrait être définie pour la permittivité et la conductivité électrique (eps-graine = sige-graine) car ces deux paramètres sont corrélés.

eps_nit \$I_eps-nit

sige_nit \$I_sige-nit

-> nit détermine le nombre de points par motif élémentaire ($2^{\text{nit}} + 1$). Par défaut, il est fixé à 3. Ce paramètre permet de régler la résolution ou la finesse des motifs.

eps_h \$I_eps-h

sige_h \$I_sige-h

-> h est un paramètre fractal représentant la rapidité de variation de la granulosité. h est choisi dans l'intervalle]0,1[. Plus h est proche de 1 et plus le volume sera chaotique. Par défaut, eps-h = sige-h = 0,5.

eps_facteur \$R_eps-facteur

sige_facteur \$R_sige-facteur

-> facteur est un facteur d'échelle de la granulosité. Il intervient dans la valeur finale de la permittivité ou de la conductivité :

$$\varepsilon_r(x, y, z) = \varepsilon_{r,moyen} + \text{eps-facteur} \times \text{granulosite}(x, y, z)$$

$$\sigma_e(x, y, z) = \sigma_{e,moyen} + \text{sige-facteur} \times \text{granulosite}(x, y, z)$$

avec *granulosite* dépend de h et nit. L'abaque 6.2 montre la relation entre h, nit et la pondération maximale. Cette dernière correspond à la valeur probaliste maximale que peut prendre *granulosite*.

h et nit sont les paramètres fractals définis ci-dessus. Les valeurs de *granulosite* sont comprises dans l'intervalle :

$$[-PondereMaximale, +PondereMaximale]$$

Remarque : La moyenne de la matrice *granulosite* peut être légèrement différente de 0. Par conséquent, la moyenne de la permittivité pourra être légèrement différente de $\varepsilon_{r,moyen}$. Même remarque concernant la conductivité moyenne.

eps_saturation \$R_SatInf \$R_SatSup \$R SatFactInf \$RSatFactSup

sige_saturation \$R_SatInf \$R_SatSup \$R SatFactInf \$RSatFactSup

-> La saturation permet d'obtenir des ruptures plus nettes dans la granulosité afin de représenter des cailloux.

SatInf et SatSup sont les valeurs des saturations inférieures et supérieures appliquées à granulosite (x, y, z) .

Ses valeurs doivent être comprises dans l'intervalle $[-PondereMaximale, +PondereMaximale]$ pour qu'une modification sur la granulosité ait lieu.

sat-fact-inf et sat-fact-sup sont des facteurs qui permettent d'atténuer l'effet de la saturation. Ils sont définis comme suit :

Si $(SatInf > granulosite(x, y, z))$

alors $granulosite(x, y, z) = SatInf + SatFactInf (granulosite(x, y, z) - SatInf)$.

Si $(SatSup < granulosite(x, y, z))$

alors $granulosite(x, y, z) = SatSup + SatFactSup (granulosite(x, y, z) - SatSup)$.

volume \$I_Nxg \$I_Nyg \$I_Nzg \$I_idxg \$I_idyg \$I_idzg

-> Le milieu peut être associé à un volume précis qui fait lui même parti d'une scène plus importante (figure 6.1). Cette notion est intéressante pour la simulation efficace de radargram. L'idée est de pouvoir reproduire expérimentalement le déplacement du radar GPR au dessus d'un sol (la scène). A chaque déplacement du radar, une simulation est donc associée. Cependant, afin d'éviter d'avoir des volumes de calcul trop important parce que couvrant toute la scène de mesure, le radar GPR simulé est positionné au centre d'une partie tronquée de la scène. Ceci présuppose en fait que le radar GPR rayonne sur une étendue limitée relativement à la longueur d'onde. C'est le cas en général du fait de la limitation de la résolution. Finalement, le radar GPR modélisé ne bouge pas d'une simulation à l'autre dans le volume de calcul, c'est la scène qui glisse dessous. Afin de garder la continuité de la granulosité de la scène globale, il faut tout d'abord qu'à chaque simulation reproduire la granulosité sur toute la scène. Pour cela, La graine et le volume de la scène sur lequel la granulosité fractale est calculé, ne doivent pas changer. Ensuite, il faut extraire la partie voulue de la scène pour la simulation.

Les données Nxg, Nyg et Nzg représentent la taille volumique de la scène en nombre de cellules (figure 6.1). Ensuite, idxg, idyg et idzg indiquent la position dans la scène du point minimal de la partie tronquée.

En règle générale, la scène totale est tronquée uniquement dans la direction de déplacement du radar GPR. Dès lors, pour les autres directions, les paramètres associés à l'identifiant volume peuvent être laissé à 0. Cela veut dire que la taille pour ces directions est celle spécifiée dans le bloc <structure> pour le milieu fractal. Par exemple, si le radar se déplace suivant la direction x alors on peut fixer Nyg, Nzg, idyg et idzg à 0.

Remarque 1 : si le milieu est granuleux sur la permittivité, alors seul les paramètres eps-moyen, eps-graine et eps-facteur doivent être définis, les autres paramètres ont des valeurs par défaut. Même remarque concernant la conductivité électrique.

Remarque 2 : Un sol présentant une granulosité ne peut être infini car en théorie, les PML ne sont pas efficaces pour les milieux inhomogènes (à vérifier toutefois pour les milieux faiblement hétérogènes...).

C'est pourquoi, le sol inhomogène est entouré sur ses cotés par un milieu homogène qui peut pénétrer dans les PML (figure 6.1, le volume de calcul).

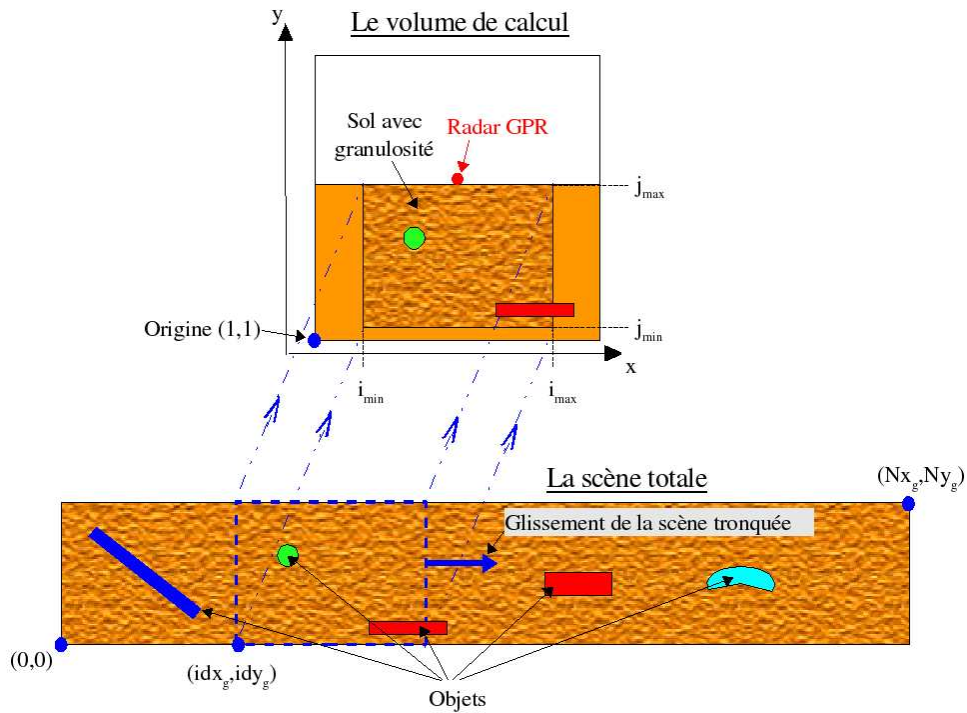


FIG. 6.1 – Shéma 2D d'une simulation d'un radar GPR avec un sol contenant une granulosité, partie tronquée de la scène en traits pointillés épais.

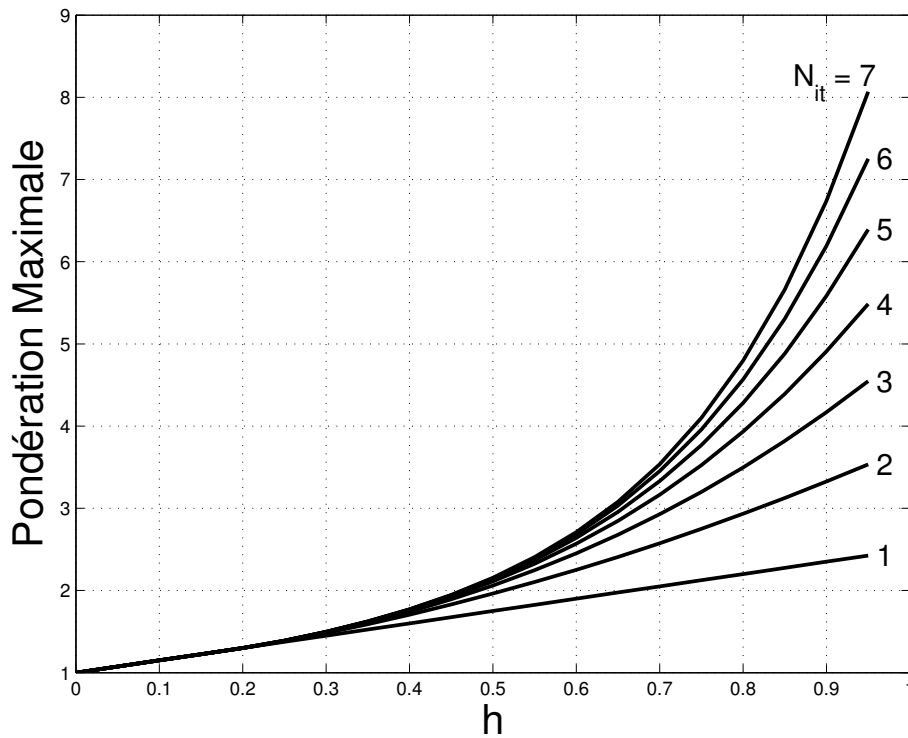


FIG. 6.2 – Abaque des variations des maxima de la granulosité en fonction de h et N_{it}

Conseil : Si la permittivité et la conductivité sont corrélées alors le milieu granuleux présentera les mêmes valeurs sur la permittivité et la conductivité pour la graine, h et n_{it} .

Blocs requis : aucun

Ordre - Règle d'apparition

Les caractéristiques de chaque milieu définies par les sous-identifiants (c'est à dire les propriétés définies avec epsr, epsrx, epsry...) peuvent être décrites dans n'importe quel ordre. C'est la même liberté pour les milieux fractals. Si une caractéristique du milieu est définie deux fois, la dernière définition écrasera la précédente. Dans l'exemple suivant, on voit que les coordonnées de chaque paramètre sont dictées par les dernières définitions :

```
milieu mil_absurde # par défaut ->  $\varepsilon_r(1,1,1); \mu_r(1,1,1); \sigma_e(0,0,0); \sigma_h(0,0,0)$ 
    epsr 2.5 # les valeurs des composantes deviennent ->  $\varepsilon_r(2.5,2.5,2.5)$ 
    epsrx 1 # les valeurs des composantes deviennent ->  $\varepsilon_r(1.0,2.5,2.5)$ 
    mury 2.6 # les valeurs des composantes deviennent ->  $\mu_r(1.0,2.6,1.0)$ 
    sigex 1e-4 # les valeurs des composantes deviennent ->  $\sigma_e(1e-4,0,0)$ 
    sig 2e-4 # les valeurs des composantes deviennent ->  $\sigma_e(2e-4,2e-4,2e-4)$ 
    sigex 1.5e-3 # les valeurs des composantes deviennent ->  $\sigma_e(2e-4,2e-4,1.5e-4)$ 
```

Exemple classique :

Définition de quatre milieux : epoxy, teflon avec pertes, un milieu anisotrope et un milieu magnétique.

```
<milieu_simple
    milieu epoxy
        epsr 4.5
    milieu teflon
        epsr 2.2
        sig 1e-6
    milieu anistotrope
        epsr 3.0
        epsrx 4.0
        sigex 1e-4
    milieu magnetique
        mur 2.0
milieu_simple>
```

Exemple de milieu à granulosité de volume :

La permittivité et la conductivité sont stockées sur tout le volume du milieu granuleux.

```
<volume_de_calcul
    nxnynz 60 60 60
    dxdydz 1e-3 1e-3 1e-3
    duree_totale 1e-9
    non_moyennage_permittivite
    non_moyennage_conductivite_electrique
volume_de_calcul>
<frontieres
    profil_pml_geometrique 8 1e-3 2.2
```

```

frontieres>
<milieu_simple
    milieu_fractal m1
        eps_moyen 3.5
        eps_graine 7
        eps_facteur 1
        eps_nit 4
        eps_h 0.5
        sige_moyen 3.5e-4
        sige_graine 7
        sige_facteur 1e-4
        sige_nit 3
        sige_h 0.5
    milieu m2
        epsr 4.0
    milieu m3
        epsr 3.0
milieu_simple>
<structure
    m1 5 53 5 53 5 53
structure>
<resultat_champ_volume
    volepsrx x 5 53 5 53 5 53 1 1 1
    volepsry y 5 53 5 53 5 53 1 1 1
    volepsrz z 5 53 5 53 5 53 1 1 1
    volsigex x 5 53 5 53 5 53 1 1 1
    volsigey y 5 53 5 53 5 53 1 1 1
    volsigez z 5 53 5 53 5 53 1 1 1
resultat_champ_volume>

```

Exemple d'un radar _GPR sur une scène glissante tronquée :

La scène est tronquée suivant x. Sa longueur totale fait 3 mètres alors que le volume de calcul fait une longueur de 60 cm dans la même direction. Le radar GPR est un dipôle à charges réparties (antenne de Wu-King). L'exemple présenté correspond à la première simulation où le radar GPR se trouve au début de la scène. D'une simulation à l'autre, seule la valeur idxg change ainsi que les objets qui glissent en même temps que la scène tronquée.

```

<volume_de_calcul
    nxnynz 300 60 150
    dxdydz 2e-3 3e-3 2e-3
    duree_total 7e-9
volume_de_calcul>
<fonction_source
    sino_gaussienne gene

```

```

    freq_centrale 1e9
    duree 1.e-9
    att_pied 100
fonction_source>
<milieu_simple
  milieu_fractal m_fractal
    #      Nxg  Nyg Nzg idxg idyg idzg
    volume 1500 0  0  5  0  0
    eps_moyen 6.0
    eps_graine 7540
    eps_facteur 1.25
    eps_nit 4
    eps_h 0.7
    sige_moyen 5e-4
    sige_graine 7540
    sige_facteur 0
    sige_nit 4
    sige_h 0.7
  milieu diele1
    epsr 6.0
    sige 5e-4
  milieu dieleair
    epsr 1.0
milieu_simple>
<structure
  # Le sol homogène par défaut :
  diele1 0 301 0 61 20 201
  # la scène tronquée :
  m_fractal 2 299 0 61 20 148
  # Les objets :
  dieleair  0  392  0 86 140 282
  metal    287  299  0 86 100 106
  metal    288  298  0 86 99 107
  metal    289  297  0 86 98 108
  metal    291  295  0 86 97 109
structure>
<structure_toron_filare
  # LE RADAR GPR
  Toron1 150 150 5 56 10 10
    Ffil1 0 0 0 0.01e-3
  # Pour des raisons de places, les résistances
  # sont décrites sur deux colonnes.
  R Ffil1 1 1912.1826  R Ffil1 2 637.3942
  R Ffil1 3 382.4365   R Ffil1 4 273.1689
  R Ffil1 5 212.4647   R Ffil1 6 173.8348
  R Ffil1 7 147.091    R Ffil1 8 127.4788

```

```

R Ffil1 9 112.4813   R Ffil1 10 100.6412
R Ffil1 11 91.0563   R Ffil1 12 83.1384
R Ffil1 13 76.4873   R Ffil1 14 70.8216
R Ffil1 15 65.9373   R Ffil1 16 61.6833
R Ffil1 17 57.9449   R Ffil1 18 54.6338
R Ffil1 19 51.6806   R Ffil1 20 49.0303
R Ffil1 21 46.6386   R Ffil1 22 44.4694
R Ffil1 23 42.4929   R Ffil1 24 40.6847
R Ffil1 25 39.0241
GV1 Ffil1 26 gene 1.0 956.1
R Ffil1 27 39.0241   R Ffil1 28 40.6847
R Ffil1 29 42.4929   R Ffil1 30 44.4694
R Ffil1 31 46.6386   R Ffil1 32 49.0303
R Ffil1 33 51.6806   R Ffil1 34 54.6338
R Ffil1 35 57.9449   R Ffil1 36 61.6833
R Ffil1 37 65.9373   R Ffil1 38 70.8216
R Ffil1 39 76.4873   R Ffil1 40 83.1384
R Ffil1 41 91.0563   R Ffil1 42 100.6412
R Ffil1 43 112.4813  R Ffil1 44 127.4788
R Ffil1 45 147.091   R Ffil1 46 173.8348
R Ffil1 47 212.4647  R Ffil1 48 273.1689
R Ffil1 49 382.4365  R Ffil1 50 637.3942
R Ffil1 51 1912.1826

structure_toron_filare>
<temps_frequence
  IFddr 50e6 6e9 50e6
  IT0 0 1 2.25e-11
temps_frequence>
<fichier_sortie
  mantisse_reel ES13.5E2
fichier_sortie>
<resultat_toron_filare
  # Relevé du courant en temporel pour le radargram
  I1 IT0 IFddr Toron1 Ffil1 26
resultat_toron_filare>

```

6.1.2 Informations complémentaires

1. Les pertes dans les structures peuvent être représentées par la tangente de pertes ou l'angle de pertes. Ils sont reliés à la conductivité électrique par la relation suivante :

$$\tan \delta_p = \frac{\sigma_e}{2\pi f_0 \varepsilon_0 \varepsilon_r}$$

L'angle de perte δ_p est en général défini pour une fréquence f_0 . On peut alors déduire la conductivité électrique correspondante σ_e .

2. Le temps et la place mémoire vont varier en fonction des caractéristiques des milieux. Si le volume de calcul est homogène (aucun milieu de défini mis à part le milieu par défaut décrit dans le bloc <volume_calcul>),

6 tableaux 3D de réels sont alloués pour les 6 composantes du champ (E,H). Si un milieu supplémentaire est défini avec une permittivité nouvelle, 3 tableaux 3D supplémentaires sont alloués. Même chose avec la perméabilité. Si un milieu supplémentaire est défini avec des pertes électriques, alors 6 tableaux 3D sont nécessaires en plus des 6 tableaux initiaux. Même chose pour les milieux magnétiques. En conclusion, au maximum 18 tableaux 3D peuvent être nécessaires à une simulation (si pertes électriques et magnétiques) et 9 ou 12 tableaux si le milieu est sans pertes.

6.2 Milieux dispersifs, <milieu_dispersif>

6.2.1 Rôle et syntaxe

Les milieux dispersifs présentent des caractéristiques fonction de la fréquence avec des paramètres définis en fréquence dans le plan complexe. Le bloc a pour objectif de déclarer les milieux dispersifs du volume et de définir leurs caractéristiques électromagnétiques. Chaque définition de milieu commence par une déclaration suivi de plusieurs lignes décrivant les caractéristiques constituant le milieu. Trois types de milieux dispersifs peuvent être traités : le modèle de Debye, le modèle de Lorentz et le modèle global. Les formules de ces modèles et leurs propriétés sont décrites dans le paragraphe 6.2.2. On retiendra que les modèles traités peuvent contenir plusieurs pôles d'ordre 1 ou 2.

Syntaxe et signification (identifiants de base)

La description d'un milieu commence par sa déclaration. Elle consiste à donner un nom au milieu défini. Ensuite, ses caractéristiques électromagnétiques sont données en dessous.

milieu \$C_nom_milieu

-> Déclaration d'un milieu dispersif. Par défaut, le milieu déclaré correspond au vide ($\varepsilon_r = \mu_r = 1$; $\sigma_e = \sigma_h = 0$) ou au milieu défini dans le bloc <volume_calcul>.

nom_milieu : le nom du milieu

Pour chaque milieu déclaré, leurs propriétés sont définies en dessous de la déclaration, inhibant les valeurs par défaut correspondantes. Toutes les propriétés propres à un milieu apparaissent entre la déclaration de celui-ci et la déclaration du milieu suivant ou du nom de fin de bloc. Les propriétés du milieu sont identifiées par des sous-identifiants. En outre, tous les sous-identifiants du bloc <milieu_simple> peuvent être utilisés pour le même emploi :

1. **epsr, epsrx, epsry, epsrz** # -> permittivité relative
2. **mur, murx, mury, murz** # -> perméabilité relative
3. **sige, sigex, sigey, sigez** # -> conductivité électrique
4. **sigh, sighx, sighy, sighz** # -> conductivité magnétique

Les conductivités (listes 3 et 4) se rajoutent aux pertes des milieux dispersifs (cf. §6.2.2).

Ensuite, les valeurs des permittivités et perméabilités relatives (listes 1 et 2)) sont inhibées respectivement par celles des milieux dispersifs listées ci-dessous par leurs identifiants :

5. **epsrd, epsrdxx, epsrdyy, epsrdzz**
-> permittivités relatives complexes et dispersives (epsrd : pour x,y,z ; epsrdxx : suivant x seulement ; epsrdyy suivant y seulement ; epsrdzz : suivant z seulement)
6. **murd, murdxx, murdyy, murdzz**
-> perméabilités relatives complexes et dispersives (murd : pour x,y,z ; murdxx : suivant x seulement ; murdyy suivant y seulement ; murdzz : suivant z seulement)

Pour tous les sous-identifiants des listes 5 et 6 ci-dessus, leurs propriétés dépendent du modèle : Debye, Lorentz ou global. La forme syntaxique pour chacun des trois modèles est donnée ci-dessous. Chaque ligne défini avec un modèle correspond à un pôle (pôle i) du modèle. Le modèle peut comporter un nombre non limité de pôles (dans la réalité, plus le nombre de pôles est important, plus le calcul est long et la taille mémoire importante).

epsrd debye \$R_ε∞ \$R_εstatique \$R_τi \$R_gi

- > Un pôle d'ordre 1 du milieu selon le modèle de Debye, appliqué au 3 composantes de la permittivité relative complexe :
- ε_∞ : permittivité pour les fréquences très supérieures à la fréquence de relaxation. La valeur doit être la même pour tous les pôles du milieu.
- ε_s : permittivité pour les fréquences très inférieures à la fréquence de relaxation. La valeur doit être la même pour tous les pôles du milieu.
- τ_i : temps de relaxation du pôle n°i, unité : seconde
- g_i : coefficient compris entre 0 et 1 du pôle i. Ce coefficient est égal à 1 lorsque le matériau est décrit avec un seul pôle (cf.§6.2.2).

epsrd lorentz \$R_{\varepsilon_\infty}\$ \$R_{\varepsilon_{statique}}\$ \$R_{\omega_i}\$ \$R_{\alpha_i}\$ \$R_{g_i}\$

- > Un pôle d'ordre 2 du milieu selon le modèle de Lorentz, appliqué au 3 composantes de la permittivité relative complexe :
- ε_∞ : permittivité pour les fréquences très supérieures à la fréquence de résonance f_i . La valeur doit être la même pour tous les pôles du milieu.
- ε_s : permittivité pour les fréquences très inférieures à la fréquence de résonance. La valeur doit être la même pour tous les pôles du milieu.
- ω_i : pulsation de résonance du pôle i, unité : rad/s
- α_i : coefficient d'amortissement du pôle i, unité s^{-1}
- g_i : coefficient compris entre 0 et 1. Ce coefficient est égal à 1 lorsque le matériau est décrit avec un seul pôle (cf.§6.2.2).

epsrd modele_global \$R_{\varepsilon_\infty}\$ \$R_{A_i}\$ \$R_{B_i}\$ \$R_{\alpha_i}\$ \$R_{\beta_i}\$

- > Un pôle d'ordre 1 ou 2 du milieu selon un modèle général, appliqué au 3 composantes de la permittivité relative complexe :
- ε_∞ : permittivité pour les fréquences très supérieures à la fréquence de résonance f_i . La valeur doit être la même pour tous les pôles du milieu.
- A_i et B_i : coefficients réelles du pôle n°i, cf.§6.2.2
- α_i et β_i : coefficients réelles du pôle n°i, cf. §6.2.2.

La syntaxe pour chacun des trois modèles s'applique aussi pour les autres mots clés de la liste 5, c'est à dire : **epsrdxx**, **epsrdyy**, **epsrdzz**.

murd debye \$R_{\mu_\infty}\$ \$R_{\mu_{statique}}\$ \$R_{\tau_i}\$ \$R_{g_i}\$

- > Un pôle d'ordre 1 du milieu selon le modèle de Debye, appliqué au 3 composantes de de la perméabilité relative complexe :
- μ_∞ : perméabilité pour les fréquences très supérieures à la fréquence de relaxation. La valeur doit être la même pour tous les pôles du milieu.
- μ_s : perméabilité pour les fréquences très inférieures à la fréquence de relaxation. La valeur doit être la même pour tous les pôles du milieu.
- τ_i : temps de relaxation du pôle n°i, unité : seconde
- g_i : coefficient compris entre 0 et 1 du pôle i. Ce coefficient est égal à 1 lorsque le matériau est décrit avec un seul pôle (cf.§6.2.2).

murd lorentz \$R_{\mu_\infty}\$ \$R_{\mu_{statique}}\$ \$R_{\omega_i}\$ \$R_{\alpha_i}\$ \$R_{g_i}\$

- > Un pôle d'ordre 2 du milieu selon le modèle de Lorentz, appliqué au 3 composantes de de la perméabilité relative complexe :
- μ_∞ : permittivité pour les fréquences très supérieures à la fréquence de résonance f_i . La valeur doit être la même pour tous les pôles du milieu.
- μ_s : permittivité pour les fréquences très inférieures à la fréquence de résonance. La valeur

doit être la même pour tous les pôles du milieu.

ω_i : pulsation de résonance du pôle i , unité : rad/s

α_i : coefficient d'amortissement du pôle i , unité s^{-1}

g_i : coefficient compris entre 0 et 1. Ce coefficient est égal à 1 lorsque le matériau est décrit avec un seul pôle (cf.§6.2.2).

murd modele_global \$R_{\mu_{\infty}}\$ \$R_{A_i}\$ \$R_{B_i}\$ \$R_{\alpha_i}\$ \$R_{\beta_i}\$

-> Un pôle d'ordre 1 ou 2 du milieu selon un modèle général, appliqué au 3 composantes de la perméabilité relative complexe :

μ_{∞} : perméabilité pour les fréquences très supérieures à la fréquence de résonance f_i . La valeur doit être la même pour tous les pôles du milieu.

A_i et B_i : coefficients réelles du pôle $n^{\circ}i$, cf.§6.2.2

α_i et β_i : coefficients réelles du pôle $n^{\circ}i$, cf.§6.2.2.

La syntaxe pour chacun des trois modèles s'applique aussi pour les autres mots clés de la liste 6, c'est à dire : **murdxx**, **murdyy**, **murdzz**.

Des pôles électriques (liste 5) peuvent être combinés avec des pôles magnétiques (liste 6).

Syntaxe et signification (identifiants particuliers)

Syntaxe et signification (identifiants pour les spécialistes)

Conseils :

- Il faut donner des noms distincts à chaque milieu et distincts aussi avec les noms des milieux simples (voir §6.1).

Blocs requis : aucun

Ordre - Règle d'apparition

- Pas d'ordre pour les identifiants et les sous-identifiants.
- Les modèles de Debye et de Lorentz peuvent être combinés pour constituer un milieu dispersif à plusieurs pôles d'ordre 1 et 2 (cf. §6.2.2). Toutefois, le modèle général ne devrait pas être combiné avec les modèles de Debye et de Lorentz...
- Attention car les règles d'inhibition des milieux simples (cf.§6.1) ne s'appliquent pas entre les sous-identifiants des listes 5 ou 6. Au contraire, comme un milieu peut être composé de plusieurs pôles d'ordre 1 ou 2, chaque ligne identifiée par un mot clé de la liste 5 ou 6 est la description d'un pôle du milieu dispersif.

Exemple classique :

L'eau est décrite par un modèle de Debye avec les valeurs suivantes :

$$\varepsilon_{\infty} = 1,8 \quad \varepsilon_s = 81 \quad \tau = 9,4e - 12 \text{ s}$$

On peut aussi définir le milieu eau à l'aide du modèle global :

$$\varepsilon_{\infty} = 1,8 ; A = 8,425532e12 ; B = 0 ; \alpha = 1.0638298e11 ; \beta = 0$$

<milieu_dispersif

milieu eau

epsrd debye 1.8 81 9.4e-12 1.0

Définition du même milieu mais avec le modèle global

milieu eau1

epsrd modele_global 1.8 8.425532e12 0.0 1.0638298e11 0.0

```
milieu_dispersif>
```

Exemple 2 :

Voici un modèle de Lorentz à deux pôles, extrait du livre de Luebbers & Kunz [?] :

$$\text{pôle 1 : } \varepsilon_{\infty} = 1,5 ; \varepsilon_s = 3,0 ; \omega_1 = 2\pi \cdot 20e9 \text{ rad.s}^{-1} ; \alpha_1 = 0,1\omega_1 ; G_1 = 0,4$$

$$\text{pôle 2 : } \varepsilon_{\infty} = 1,5 ; \varepsilon_s = 3,0 ; \omega_2 = 2\pi \cdot 50e9 \text{ rad.s}^{-1} ; \alpha_2 = 0,1\omega_2 ; G_2 = 0,6$$

Si on définit le milieu par le modèle global, on a :

$$\text{pôle 1 : } \varepsilon_{\infty} = 1,5 ; A_1 = 0 ; B_1 = 7,577828e10 ; \alpha_1 = 1,25664e10 ; \beta_1 = 1.25034e11$$

$$\text{pôle 2 : } \varepsilon_{\infty} = 1,5 ; A_2 = 0 ; B_2 = 2.841678e11 ; \alpha_2 = 3.14159e10 ; \beta_2 = 3.12584e11$$

```
<milieu_dispersif
milieu lorentz_2pole
    epsrd lorentz 1.5 3.0 1.25664e11 1.25664e10 0.4
    epsrd lorentz 1.5 3.0 3.14159e11 3.14159e10 0.6
milieu lorentz_2pole_v2 # meme milieu que le précédent mais
# défini avec le modèle global [epsinf A B alpha beta]
    epsrd modele_global 1.5 0 7.577828e10 1.25664e10 1.25034e11
    epsrd modele_global 1.5 0 2.841678e11 3.14159e10 3.12584e11
milieu_dispersif>
```

Exemple 3 :

Le modèle de Drude est utilisé dans la caractérisation des plasmas. Voici un exemple classique de plasma avec les caractéristiques suivantes :

$$\varepsilon_{\infty} = 1,0 ; F_p = 28,7 \text{ GHz} ; \nu_c = 20 \cdot 10^9 \text{ rad.s}^{-1}$$

$$\hookrightarrow \varepsilon_{\infty} = 1 ; \varepsilon_s - \varepsilon_{\infty} = -81,295 ; \sigma = 14.376 \text{ S.m}^{-1} \tau = 50 \text{ ps}$$

L'exemple complet ci-dessous permet d'obtenir directement, les modules en dB du coefficient de réflexion et de transmission en incidence normale, d'une lame plasma de 15mm d'épaisseur. L'espace est 1D grâce au placement des murs électriques et magnétiques. Afin d'éviter la singularité à fréquence nulle du milieu plasma, une dérivée de gaussienne est la fonction source appliquée. Une onde plane est envoyée dans la direction Ox positif. Ainsi à gauche de la face de Huygens excitatrice, on récupère directement le champ réfléchi. Les coefficients de réflexion et de transmission sont obtenus directement grâce à la normalisation.

```
<volume_calcul
    nxnynz 300 1 1
    dxdydz 0.075e-3 0.075e-3 0.075e-3
    duree_totale 2e-9
volume_calcul>
<frontieres
    mur_magnetique xozinf xozsup
    mur_electrique xoyinf xoysup
```

```

frontieres>
<fichier_sortie
    extension dtplasma
fichier_sortie>
<fonction_source
    derivee_gaussienne dg1
        fmax 80e9
        att_pied 1000
fonction_source>
<onde_plane    # illumination suivant 0x, polar Ez,Hy
    dim_huygens 45 260 1 2  1 2    #valeur quelconque pour imax mais imax>imin
    surface yozinf    #une seule face pour envoyer l'onde
    injecteur dg1 90 0 0 1.0
onde_plane>
<milieu_dispersif
    milieu plasma
        sige 14.376
        epsrd debye 1 -80.295 50e-12 1
milieu_dispersif>
<structure
    plasma 50 250 1 2 1 2
structure>
<temps_frequence
    IT1
    IF1 0.1e9 80e9 0.1e9 # la bande de fréquence
temps_frequence>
<resultat_champ_point
    normalisation_freq dg1 1.0
    module_db
    ptref IT1 IF1  ez  40  1 1    #le coefficient de réflexion
    ptrans IT1 IF1 ez  250 1 1
resultat_champ_point>

```

6.2.2 Informations complémentaires

La présentation théorique des modèles est faite avec la permittivité. Elle s'applique aussi pour les milieux dispersifs magnétiques en remplaçant la permittivité par la perméabilité.

Modèle de Debye

Ce modèle est lié à la polarisation par orientation des molécules polaires. L'action du champ électrique induit un mouvement de rotation des molécules. Cependant, ces rotations sont perturbées par les chocs inter-moléculaires ce qui rend les mécanismes d'amortissement prépondérants. Ces mécanismes sont caractérisés par un temps de relaxation τ ou temps moyen entre deux chocs inter-moléculaires successifs. On notera que ce mécanisme est très dépendant de la température. Le temps de relaxation τ peut varier dans

une plage comprise entre plusieurs jours (pour des molécules pratiquement bloquées) et 10^{-11} à 10^{-12} secondes (domaine des radiotélécommunications). Précisons que le maximum d'absorption apparaît pour des fréquences de l'ordre de l'inverse du temps de relaxation. De par la prédominance des mécanismes d'amortissement, le modèle de permittivité est du premier ordre. Il est défini dans les domaines fréquentiel et temporel par :

$$\hat{\varepsilon}_r(\omega) = \varepsilon_\infty + \hat{\chi}_e(\omega) = \varepsilon_\infty + \frac{\varepsilon_s - \varepsilon_\infty}{1 + j\omega\tau} \quad (6.1)$$

$$\varepsilon_r(t) = \varepsilon_\infty \delta(t) + \chi_e(t) = \varepsilon_\infty \delta(t) + \frac{\varepsilon_s - \varepsilon_\infty}{\tau} e^{-t/\tau} u(t) \quad (6.2)$$

Avec $\hat{\varepsilon}_r$ la permittivité relative complexe, $\hat{\chi}_e$ la susceptibilité complexe du milieu, ε_∞ la permittivité pour les fréquences très supérieures à la fréquence de relaxation, ε_s la permittivité pour les fréquences très inférieures à la fréquence de relaxation, τ le temps de relaxation, $\delta(t)$ la distribution de Dirac et $u(t)$ la fonction de Heaviside. Le modèle de Debye à N pôles est construit à partir de la superposition de susceptibilité du modèle de Debye à un pôle de l'équation 6.1 :

$$\hat{\varepsilon}_r(\omega) = \varepsilon_\infty + \hat{\chi}_{e,N}(\omega) = \varepsilon_\infty + \sum_{i=1}^N G_i \frac{(\varepsilon_s - \varepsilon_\infty)}{1 + j\omega\tau_i} \quad (6.3)$$

$$\text{avec } \sum_{i=1}^N G_i = 1 \quad (6.4)$$

Les permittivités ε_∞ et ε_s sont indépendantes des pôles du modèle par la condition 6.4.

Modèle de Lorentz

Les polarisations de type électronique et atomique sont à l'origine du modèle de Lorentz. La polarisation électronique se manifeste à l'échelle atomique. Sa fenêtre spectrale d'influence est la bande optique. La polarisation atomique se manifeste à l'échelle moléculaire et sa fenêtre spectrale d'influence couvre plutôt la bande infrarouge. De par la prédominance du phénomène oscillatoire des deux polarisations, le modèle de permittivité est du deuxième ordre. Il est défini dans les domaines fréquentiel et temporel par :

$$\hat{\varepsilon}_r(\omega) = \varepsilon_\infty + \hat{\chi}_e(\omega) = \varepsilon_\infty + \frac{\omega_0^2 (\varepsilon_s - \varepsilon_\infty)}{\omega_0^2 + 2j\omega\alpha_0 - \omega^2} \quad (6.5)$$

$$\varepsilon_r(t) = \varepsilon_\infty \delta(t) + \chi_e(t) = \varepsilon_\infty \delta(t) + \gamma_0 \sin(\beta_0 t) e^{-\alpha_0 t} u(t) \quad (6.6)$$

$$\beta_0 = \sqrt{\omega_0^2 - \alpha_0^2} \text{ et } \gamma_0 = \frac{\omega_0^2 (\varepsilon_s - \varepsilon_\infty)}{\beta_0}$$

Avec $\hat{\varepsilon}_r$ la permittivité relative complexe, $\hat{\chi}_e$ la susceptibilité complexe du milieu, ε_∞ la permittivité pour les fréquences très supérieures à la fréquence de résonance $f_0 = 2\pi\omega_0$, ε_s la permittivité pour les fréquences très inférieures à la fréquence de résonance, α_0 le coefficient d'amortissement, $\delta(t)$ la distribution de Dirac et $u(t)$ la fonction de Heaviside. Le modèle de Lorentz à N pôles est construit à partir de la superposition de susceptibilités du modèle de Lorentz à un pôle de l'équation 6.5 :

$$\hat{\varepsilon}_r(\omega) = \varepsilon_\infty + \hat{\chi}_{e,N}(\omega) = \varepsilon_\infty + \sum_{i=1}^N G_i \frac{\omega_i^2 (\varepsilon_s - \varepsilon_\infty)}{\omega_i^2 + 2j\omega\alpha_i - \omega^2} \quad (6.7)$$

$$\varepsilon_r(t) = \varepsilon_\infty \delta(t) + \sum_{i=1}^N G_i \gamma_i \sin(\beta_i t) e^{-\alpha_i t} u(t) \quad (6.8)$$

$$\text{avec } \sum_{i=1}^N G_i = 1 ; \beta_i = \sqrt{\omega_i^2 - \alpha_i^2} ; \gamma_i = \frac{\omega_i^2 (\varepsilon_s - \varepsilon_\infty)}{\beta_i} \quad (6.9)$$

Les permittivités ε_∞ et ε_s sont indépendantes des pôles du modèle par la condition 6.9.

Modèle généralisé

Le modèle généralisé est défini dans le domaine temporel comme suit :

$$\varepsilon_r(t) = \varepsilon_\infty \delta(t) + [A \cos(\beta t) + B \sin(\beta t)]^{-\alpha t} u(t) \quad (6.10)$$

avec A, B, ε_∞ , α et β les coefficients à déterminer.

On peut se ramener à un modèle de Lorentz en posant :

$$A = 0 \quad \text{et} \quad B = \omega_0^2 (\varepsilon_s - \varepsilon_\infty) / \beta$$

$$\alpha = \alpha_0 \quad \text{et} \quad \beta = \sqrt{\omega_0^2 - \alpha_0^2}$$

ou à un modèle de Debye en posant :

$$A = (\varepsilon_s - \varepsilon_\infty) / \tau \quad \text{et} \quad B = 0$$

$$\alpha = 1/\tau \quad \text{et} \quad \beta = 0$$

Modèle généralisé à N pôles

Les modèles de Debye et de Lorentz peuvent traiter respectivement M pôles d'ordre 1 et (N-M) pôles d'ordre 2. Les deux modèles peuvent bien-entendu être combinés. On aura alors un modèle Debye-Lorentz qui peut s'exprimer comme suit :

$$\hat{\varepsilon}_r(\omega) = \varepsilon_\infty + \sum_{i=1}^M G_i \frac{(\varepsilon_s - \varepsilon_\infty)}{1 + j\omega\tau_i} + \sum_{i=M+1}^N G_i \frac{\omega_i^2 (\varepsilon_s - \varepsilon_\infty)}{\omega_i^2 + 2j\omega\alpha_i - \omega^2} \quad (6.11)$$

$$\text{avec } \sum_{i=1}^N G_i = 1 \quad (6.12)$$

A partir du modèle généralisé, un modèle à N pôles peut aussi être construit :

$$\varepsilon_r(t) = \varepsilon_\infty \delta(t) + \sum_{i=1}^N [A_i \cos(\beta_i t) + B_i \sin(\beta_i t)]^{-\alpha_i t} u(t) \quad (6.13)$$

Modèle de Drude

C'est un modèle particulier qui présente deux pôles d'ordre 1 dont un à la fréquence nulle. Il permet de décrire les milieux plasmas non magnétisés. Il est défini de la manière suivante :

$$\hat{\varepsilon}_r(\omega) = \varepsilon_\infty + \frac{\omega_p^2}{\omega(j\nu_c - \omega)} \quad (6.14)$$

Par une décomposition en éléments simples, la relation 6.14 devient :

$$\hat{\varepsilon}_r(\omega) = \varepsilon_\infty + \frac{\omega_p^2}{j\nu_c\omega} - \frac{\omega_p^2}{\nu_c^2(1 + j\omega/\nu_c)} \quad (6.15)$$

$$= \varepsilon_\infty + \hat{\chi}_e(\omega) + \frac{\sigma}{j\omega\varepsilon_0} \quad (6.16)$$

$$\text{avec } \hat{\chi}_e(\omega) = -\frac{\omega_p^2}{\nu_c^2(1 + j\omega/\nu_c)} \text{ et } \sigma = \varepsilon_0 \frac{\omega_p^2}{\nu_c}$$

Le modèle de Drude peut être traité par un modèle de Debye plus une conductivité qui prend en compte le pôle à la fréquence nulle. Les trois paramètres du modèle de Debye sont reliés à ceux du modèle de Drude par les relations :

$$\varepsilon_\infty = 1 ; \varepsilon_s - \varepsilon_\infty = -\left(\frac{\omega_p}{\nu_c}\right)^2 \text{ et } \tau = \frac{1}{\nu_c}$$

Chapitre 7

Huygens et Formes d'onde

La surface de Huygens est utilisée aussi bien pour l'illumination de structure (en réception) que pour le calcul du champ rayonné à l'aide d'un noyau de Green.

Les sources d'excitation possibles sont l'onde plane pour les problèmes de réception et les alimentations locales en tension et en courant. A chaque source est associée une fonction temporelle qui décrit la forme de l'excitation (gaussienne, sinus, ...). Les formes d'excitation sont définies dans le bloc `<fonction_source>`. C'est pourquoi il devra apparaître avant les autres blocs d'excitation.

7.1 Surface de Huygens, `<surface _huygens>`

7.1.1 Rôle - syntaxe

Ce bloc est indispensable pour le calcul du champ lointain ou pour les sources dipolaires. On réalise dans ce bloc la déclaration et la définition de boîtes de Huygens.

Syntaxe et signification (identifiants de base)

SURF\$nom [**xinf**] [**xsup**] [**yinf**] [**ysup**] [**zinf**] [**zsup**] **\$I_{i_min}** **\$I_{i_max}** **\$I_{j_min}** **\$I_{j_max}** **\$I_{k_min}**
\$I_{k_max}

-> Déclaration et définition d'une surface de Huygens.

[**xinf**] [**xsup**] [**yinf**] [**ysup**] [**zinf**] [**zsup**] : ce sont les faces constituant la boîte de Huygens. Ces mots-clés sont tous optionnels. Si aucun n'est présent alors TRIDIMO considère que la boîte de Huygens contient ses 6 faces. Dans le cas contraire, la boîte de Huygens sera ouverte ce qui n'est pas recommandé car les bords de l'ouverture vont être une source de diffraction. Cependant, pour les problèmes bidimensionnels, la boîte de Huygens se réduit à 4 faces qu'il faudra indiquer. De même, en monodimensionnel, une ou deux faces parallèles, au plus, sont à définir.

i_{min}, **i_{max}**, **j_{min}**, **j_{max}**, **k_{min}**, **k_{max}** : coordonnées min et max de la boîte de Huygens en nombre de cellules.

origine **SURF\$nom** **\$I_i** **\$I_j** **\$I_k**

-> coordonnées de l'origine de la boîte de Huygens de nom **SURF\$nom** en nombre de cellules. Par défaut, l'origine est le centre de la surface de Huygens et elle est calculée comme suit :

$$\begin{aligned}
 i_o &= \text{INT} \{ (i_{\max} - i_{\min}) / 2 + i_{\min} \} \\
 j_o &= \text{INT} \{ (j_{\max} - j_{\min}) / 2 + j_{\min} \} \\
 k_o &= \text{INT} \{ (k_{\max} - k_{\min}) / 2 + k_{\min} \}
 \end{aligned}$$

Blocs requis : aucun

Ordre - Règle d'apparition

- L'origine doit être définie après la surface de Huygens sur laquelle elle s'applique.

Exemple classique :

```

<surface_huygens
    # 6 faces présentes par défaut
    SURF1 10 80 10 80 5 20
    # face zinf manquante, par exemple à cause d'un plan de masse
    SURF2 xinf xsup yinf ysup zsup 10 80 10 80 10 20
    # 2 faces
    SURF3 zinf zsup 10 80 10 80 10 20
    # redéfinition de l'origine pour la surface de Huygens SURF1
    origine SURF1 10 40 5
surface_huygens>

```

7.2 Fonctions sources, <fonction_source>

7.2.1 Rôle et fonction

Il décrit les formes d'excitation. Pour chaque fonction source, une déclaration au préalable est faite. Elle consiste à donner un type (gaussienne, ondelette de rayleigh...) et un nom à la fonction source :

type \$C_nomfonction

La fonction source est ensuite définie en dessous de sa déclaration. Les lignes caractérisant la fonction source s'arrêtent à la déclaration d'une nouvelle fonction ou à la fin du bloc. Pour des définitions plus précises et du rôle de chacune des fonctions sources et de leurs paramètres, consultez le paragraphe 7.2.2. Attention, en règle générale (il y a des exceptions), l'amplitude maximale de la fonction source est normalisée à 1. Celle-ci n'est pas modifiable dans ce bloc mais dans les blocs qui permettent l'insertion de l'excitation dans le volume de calcul. De même, la phase et le retard ne sont pas définis ici (voir 7.2.2). Voici la liste des fonctions sources disponibles :

- Gaussienne : la plus utilisée des fonctions sources, bande $[0, f_{max}]$.
- Sino-gaussienne : gaussienne centrée sur une fréquence donnée, possibilité de générer un déphasage constant entre deux sources sur une large bande.
- Dérivée de la gaussienne : forte réjection de la composante continue et des basses fréquences.
- Ondelette de rayleigh : forte réjection des basses fréquences, possibilité de générer un déphasage constant entre deux sources sur une large bande.
- Echelon exponentielle : fonction pour l'analyse de la réponse à un échelon.
- Sinus.
- Sinus modulé par un pulse.

Syntaxe et signification (identifiants de base)

fonction_fichier \$C_NomFonction

Cet identifiant signifie que la fonction source temporelle est quelconque. « NomFonction » est le nom de la fonction qui est utilisé par la suite dans les bloc sources. La fonction temporelle est récupérée au sein d'un fichier ASCII. Les valeurs de la fonction doivent être présentées sur une seule colonne. La base de temps doit être linéaire (pas temporel constant) mais pas forcément égale au pas temporel de la simulation FDTD. Celle-ci n'a pas besoin d'être présent dans le fichier.

Voici les informations complémentaire à fournir :

nom_fichier \$_NomFichier # OBLIGATOIRE

-> Le nom du fichier

colonne \$I_n° # OPTIONNEL

-> Le n° de colonne de la fonction dans le fichier. Par défaut, c'est la première colonne du fichier.

dt \$R_DTFonction # OPTIONNEL

-> Le pas temporel de la base de temps de la fonction source du fichier. Par défaut, il est considéré égale au pas temporel de la simulation FDTD (cf. §??, ??). Le pas temporel de la fonction est dans tous les cas borné par le pas temporel Δt_{fdd} de la façon suivante :

$$\frac{\Delta t_{fdd}}{10} \leq DTFonction \leq 100 \Delta t_{fdd}$$

Les échantillons de la fonction sont recalculés par TRIDIMO tous les pas Δt_{fdd} à partir d'une interpolation linéaire de Lagrange.

gaussienne \$C_nomfonction

La gaussienne est définie soit à partir de la durée ou du temps de montée ou de la fréquence maximale. Un seul des trois identifiants suivants sera donc présent : **duree**, **temps_montee**, **fmax**. Dans le cas contraire, le dernier identifiant parmi les trois pré-cités sera retenu par TRIDIMO. Les identifiants **att_fmax** et **att_pied** sont optionnels car des valeurs par défaut existent.

duree \$R_duree

-> La durée de l'excitation en seconde.

temps_montee \$R_temps_montee

-> Le temps de montée en seconde de 10% à 90% de l'amplitude maximale de la gaussienne.

fmax \$R_fmax

-> La fréquence maximale en hertz.

att_fmax \$R_att_fmax

-> L'atténuation à la fréquence maximale par rapport au maximum d'amplitude en fréquence. La valeur par défaut est : $\text{att_fmax} = 10$.

Cet identifiant est considéré par TRIDIMO uniquement si l'identifiant **fmax** est présent. Il n'est pas utilisé avec **duree** ou **temps_montee** !

att_pied \$R_att_pied

-> L'atténuation à l'instant $t = 0$ s par rapport au maximum d'amplitude de la gaussienne. La valeur par défaut est : $\text{att_pied} = 1000$.

sino_gaussienne \$C_nomfonction

La sino-gaussienne (gaussienne modulée par un sinus) est définie (en plus de sa fréquence centrale) soit à partir de la durée ou du temps de montée ou de la bande de fréquence. Un seul des trois identifiants suivants sera donc présent : **duree**, **temps_montee**, **bande**. Dans le cas contraire, le dernier identifiant parmi les trois pré-cités sera retenu par TRIDIMO. Les identifiants **att_fmax** et **att_pied** sont optionnels car des valeurs par défaut existent.

freq_centrale \$R_freq_centrale

-> La fréquence centrale du spectre en hertz. Par défaut, elle est nulle.

duree \$R_duree

-> La durée de l'excitation en seconde.

temps_montee \$R_temps_montee

-> Le temps de montée en seconde de 10% à 90% de l'amplitude maximale de la gaussienne.

bande_freq \$R_bande_freq

-> La bande de fréquence en hertz ($\text{bande_freq} = 2\Delta f$ soit la bande de $(\text{freq_centrale} - \Delta f)$ à $(\text{freq_centrale} + \Delta f)$).

att_fmax \$R_attfmax

-> L'atténuation aux fréquences $(\text{freq_centrale} \pm \Delta f)$ par rapport au maximum d'amplitude en fréquence. La valeur par défaut est : $\text{att_fmax} = 10$.

Cet identifiant est considéré par TRIDIMO uniquement si l'identifiant **bande_freq** est présent. Il ne sera pas utilisé avec **duree** ou **temps_montee** !

att_pied \$R_att_pied

-> L'atténuation à l'instant $t = 0$ s par rapport au maximum d'amplitude de la gaussienne. La valeur par défaut est : $\text{att_pied} = 100$

derivee_gaussienne \$C_nomfonction

Comme la gaussienne, la dérivée de la gaussienne est définie soit à partir de la durée ou du temps de montée ou de la fréquence maximale. Un seul des trois identifiants suivants sera donc présent : **duree**, **temps_montee**, **fmax**. Dans le cas contraire, le dernier identifiant parmi les trois pré-cités sera retenu par TRIDIMO. Les identifiants **att_fmax** et **att_pied** sont optionnels car des valeurs par défaut existent. Les paramètres de la dérivée de la gaussienne sont les mêmes que ceux de la gaussienne :

duree \$R_duree

-> La durée de l'excitation en seconde.

temps_montee \$R_temps_montee

-> Le temps de montée en seconde de 10% à 90% de l'amplitude maximale de la gaussienne.

fmax \$R_fmax

-> La fréquence maximale en hertz.

att_fmax \$R_att_fmax

-> L'atténuation à la fréquence maximale par rapport au maximum d'amplitude en fréquence. La valeur par défaut est : $\text{att_fmax} = 10$.

Cet identifiant est considéré par TRIDIMO uniquement si l'identifiant **fmax** est présent. Il ne sera pas utilisé avec **duree** ou **temps_montee** !

att_pied \$R_att_pied

-> L'atténuation à l'instant $t = 0$ s par rapport au maximum d'amplitude de la gaussienne. La valeur par défaut est : $\text{att_pied} = 1000$.

bi_expo \$C_nomfonction

La fonction bi-exponentielle est définie simplement à partir de deux paramètres : le temps de montée et la largeur à mi-hauteur.

temps_montee \$R_temps_montee

-> Le temps de montée en seconde de 10% à 90% de l'amplitude maximale de la bi-exponentielle.

largeur_mihauteur \$R_lmh

-> La largeur à mi-hauteur de la bi-exponentielle

ondelette_rayleigh \$C_nomfonction

L'ondelette de Rayleigh est utilisée dans la modélisation des impulsions radar. Elle présente une composante continue nulle. Elle est caractérisée par sa fréquence (non centrale) correspondant à l'amplitude maximale et par l'ordre de la fonction. L'identifiant **att_pied** est optionnel car une valeur par défaut existe.

freq_de_amax \$R_freq_de_amax

-> La fréquence correspondant à l'amplitude maximale de l'ondelette de Rayleigh en hertz.

ordre \$R_ordre

-> L'ordre est un entier positif. La valeur par défaut est 3.

att_pied \$R_att_pied

-> L'atténuation à l'instant $t = 0$ s par rapport au maximum d'amplitude de la fonction. La valeur par défaut est : $\text{att_pied} = 100$.

echelon_exponentielle \$C_nomfonction

La fonction échelon-exponentielle est définie soit par sa pente soit par son temps de montée.

temps_montee \$R_temps_montee

-> Le temps de montée en seconde de 10% à 90% de l'amplitude maximale de l'échelon.

pente \$R_pen

-> La pente de la fonction exponentielle en seconde.

sinus \$C_nomfonction

La fonction sinus est définie uniquement par sa fréquence.

freq_centrale \$R_freq_centrale

-> La fréquence du sinus en hertz.

pulse_sin \$C_nomfonction

La fonction est un sinus modulé par un pulse. Le pulse est défini dans le paragraphe 7.2.2

freq_centrale \$R_freq_centrale

-> La fréquence du sinus en hertz.

temps_montee \$R_tm

-> le temps de montée du pulse (de 0 à 100 %) en seconde. Cette valeur doit être strictement supérieur à 0.

duree \$R_duree

-> La durée du pulse en seconde

iemn_expo_quotient \$C_nomfonction

La fonction est une impulsion électromagnétique nucléaire. Elle est décrite dans le paragraphe §7.2.2. Les trois identifiants ci-dessous doivent impérativement être définis :

alpha \$R_\alpha

beta \$R_\beta

tpq \$R_{t_{pq}}

Ces trois paramètres possèdent des valeurs physiques réservées...

fonction_fichier \$C_nomfonction

La fonction est décrite dans un fichier au format ASCII. Une colonne de ce fichier doit correspondre à la fonction source. Par défaut, la colonne est la première du fichier. Le pas d'échantillonnage (ou pas temporel) de la fonction source décrite dans le fichier est par défaut le pas temporel FDTD (cf. §??). Il peut être redéfini. La base de temps est supposée à pas constant c'est pourquoi sa présence dans le fichier (si présence) est ignorée. Le nom du fichier doit obligatoirement être spécifié. Le n° de colonne et le pas d'échantillonnage peuvent être redéfinis.

nom_fichier \$C_nomfonction

-> Le nom du fichier. Il peut contenir un chemin.

colonne \$I_nu_col

-> Un n° de colonne contenant la fonction source. Par défaut nu_col = 1

dt \$R_{dt}

-> Le pas d'échantillonnage en seconde. Par défaut $dt = dt_{fdd}$

foudre_heidler \$C_nomfonction \$I_nb_terme

La fonction est utilisée dans le cadre d'application foudre. Sa forme est définie au paragraphe §7.2.2. Pour chaque terme de la fonction, cinq paramètres doivent être définis comme suit :

I_n \$R_{I_n}

-> unité : ampère

ETA_n \$R_{\eta_n}\$

-> sans unité, valeur comprise entre 0 et 1

ALPHA_n \$R_{\alpha_n}\$

-> unité : s^{-1}

BETA_n \$R_{\beta_n}\$

-> unité : s^{-1}

N_n \$I_{N_n}\$

-> valeur de la puissance

L'indice n correspond associe la valeur du paramètre au terme qui lui correspond. La première valeur de n doit être 1 pour le premier terme, puis 2 pour le deuxième terme, etc.

Blocs requis : aucun

Ordre - Règle d'apparition

Pas d'ordre pour les identifiants.

Exemple classique :

La fonction gaussienne est la plus utilisée des fonctions d'excitation car elle offre une réponse entre 0 et une fréquence maximale donnée. Voici deux gaussiennes avec leurs déclarations et leurs définitions.

```
<fonction_source
### Le minimum à définir ###
gaussienne gauss1 #ligne déclarative, gauss1 -> le nom de la gaussienne
    fmax 10e9 #10GHz # ligne de définition
### gaussienne avec une amplitude très faible à  $f_{max}$  ###
gaussienne gauss2
    fmax 10e9 #10GHz
    att_fmax 100 # atténuation de 40dB
    att_pied 1000 # ligne inutile car c'est la valeur par défaut
### gaussienne définie par son temps de montée ###
gaussienne gauss2
    temps_montee 5e-9 # 5ns
fonction_source>
```

Exemple 2 : fonction sino-gaussienne

```
<fonction_source
### Le minimum à définir ###
sino_gaussienne sg1
    freq_centrale 5e9 # 5GHz
    bande_freq 3e9 #  $\pm 1,5$ GHz autour de freq_centrale
### la partie gaussienne est définie par son temps de montée ###
sino_gaussienne sg2
    freq_centrale 5e9 # 5GHz
    temps_montee 3e-9 #
fonction_source>
```

Exemple 3 : fonction dérivée de la gaussienne

```

<fonction_source
    ### Le minimum à définir ###
    derivee_gaussienne dg1
    fmax 10e9 # 5GHz
fonction_source>

```

Exemple 4 : fonction ondelette de rayleigh

```

<fonction_source
    ondelette_rayleigh
    freq_de_amax 2e9 # 2GHz
    ordre 3
fonction_source>

```

7.2.2 Informations complémentaires

Les fonctions proposées ci-dessus sont décrites ici avec leurs formules en temps et en fréquence, les paramètres les caractérisant et leurs cotés attractifs.

Phase, retard et amplitude

La phase, le retard et l'amplitude ne sont pas définis dans le bloc <fonction_source> mais dans chacun des blocs où l'on peut insérer une source. Ceci permet de faire des sources multiples déphasées, retardées et pondérées en amplitude. Le retard et l'amplitude peuvent s'appliquer sur chacune des fonctions sources proposées. En revanche, la phase peut être appliquée sur seulement trois fonctions sources : la sino-gaussienne, l'ondelette de Rayleigh et le sinus. En ce qui concerne les deux premières, la phase appliquée opère une translation en phase des deux fonctions sur toute la bande de fréquence.

Gaussienne

Ses formes, temporelle et fréquentielle, sont définies par les relations :

$$e(t) = A_0 e^{-\frac{(t-t_0)^2}{T^2}} \xrightarrow{TF} e(f) = A_0 T \sqrt{\pi} e^{-(\pi f T)^2} e^{-j2\pi f t_0}$$

La gamme de fréquence couverte, s'étend de 0 à une fréquence maximale. Ses attraites résident dans sa souplesse d'utilisation et sa réponse large bande en fréquence $[0 - f_{max}]$. A_0 est l'amplitude de la gaussienne, t_0 est le retard par rapport à l'origine des temps et T est la largeur de l'impulsion à mi-hauteur. Trois approches sont proposées pour sa caractérisation :

1. Le domaine d'étude est une bande de fréquence connue. Il suffit alors de fixer la fréquence maximale utile (f_{max}) et l'atténuation à f_{max} ($Att_{f_{max}}$) par rapport au maximum d'amplitude situé à $f = 0$ Hz. Un paramètre indépendant est utilisé pour définir le pied de la gaussienne dans le domaine temporel. Il est fixé par l'atténuation du signal à $t = 0$ s (Att_0) par rapport au maximum d'amplitude A_0 (figure 7.1). De ces données, les paramètres t_0 et T sont directement déduits :

$$T = \frac{\sqrt{\ln(Att_{f_{max}})}}{\pi f_{max}} \quad \text{et} \quad t_0 = T \sqrt{\ln(Att_0)}$$

2. La durée de la gaussienne dans le domaine temporel est connue. Elle est égale à la valeur du temps t_{max} pour laquelle on a :

$$e(t = t_{max}) = e(t = 0) = A_0 / Att_0$$

On déduit alors les paramètres t_0 et T :

$$t_0 = t_{max}/2 \quad \text{et} \quad T = t_0 / \sqrt{\ln(Att_0)}$$

3. Le temps de montée t_m doit être fixé. Dans ce cas, les paramètres t_0 et T sont définis par les relations :

$$T = \frac{t_m}{\sqrt{\ln(10)} - \sqrt{\ln(10/9)}} \quad \text{et} \quad t_0 = T \sqrt{\ln(Att_0)}$$

La figure 7.2 met en évidence l'influence des paramètres Att_0 (cas a) et Att_{fmax} (cas b). Le premier joue directement sur le retard de l'onde dans le domaine temporel et sur la phase en fréquence. Le second modifie la largeur de l'impulsion. Ainsi, plus Att_{fmax} est important, plus la largeur de la bande excitée l'est aussi et plus la largeur de l'impulsion est étroite.

D'autre part, l'atténuation Att_0 du signal va fixer le niveau de bruit de fond, tel qu'illustré sur la figure 7.2 (cas c), où la tension a été prélevée au niveau du plan d'excitation d'une ligne μ -ruban. On voit (fig.7.2, cas c-2) que le début de l'excitation se rapproche d'une réponse à un échelon. Les oscillations que l'on voit sont liées aussi à la discontinuité du signal à $t = 0s$. Bien que très faibles, celles-ci génèrent un bruit de fond qui peut être réduit en diminuant Att_0 . Ceci ne semble toutefois pas avoir de conséquences sur la précision des résultats puisque l'erreur relative sur le module à la fréquence maximale de travail entre les deux cas présentés en (c) est de 0,8%.

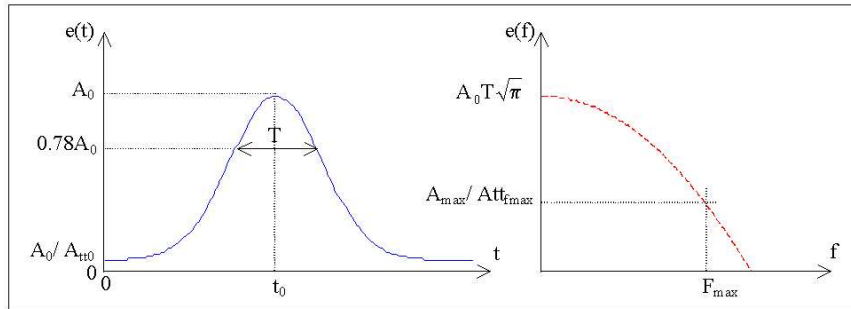


FIG. 7.1 – Paramètres de la gaussienne

Sino-gaussienne

Ses formes temporelle et fréquentielle sont définies par les relations :

$$e(t) = A_0 \sin(2\pi f_0 t) e^{-\frac{(t-t_0)^2}{T^2}} \xrightarrow{TF} e(f) = A_0 \frac{T\sqrt{\pi}}{2} e^{-(\pi(f-f_0)T)^2}$$

Cette impulsion est une gaussienne centrée à la fréquence f_0 . Les paramètres t_0 et T sont déterminés par les mêmes formules que sur la gaussienne, à la différence toutefois que le paramètre f_{max} de la gaussienne est remplacé par Δf dans les formules ($\Delta f = \text{bande}/2$). La bande correspond à la largeur de la bande spectrale utile (intervalle $[f_0 - \Delta f, f_0 + \Delta f]$). Le paramètre Att_0 peut être moins important (typiquement entre 10 et 100) car la fonction sinus vient atténuer l'effet échelon de la gaussienne à $t = 0s$. La figure 7.3 est un exemple de ce type d'excitation. Elle illustre l'influence de la largeur de la bande spectrale sur la largeur de l'impulsion temporelle. Les perturbations proches des fréquences nulle et maximale, sur la courbe de phase (avec $\Delta f = 2 \text{ GHz}$), sont dues au niveau proche de zéro de la fonction.

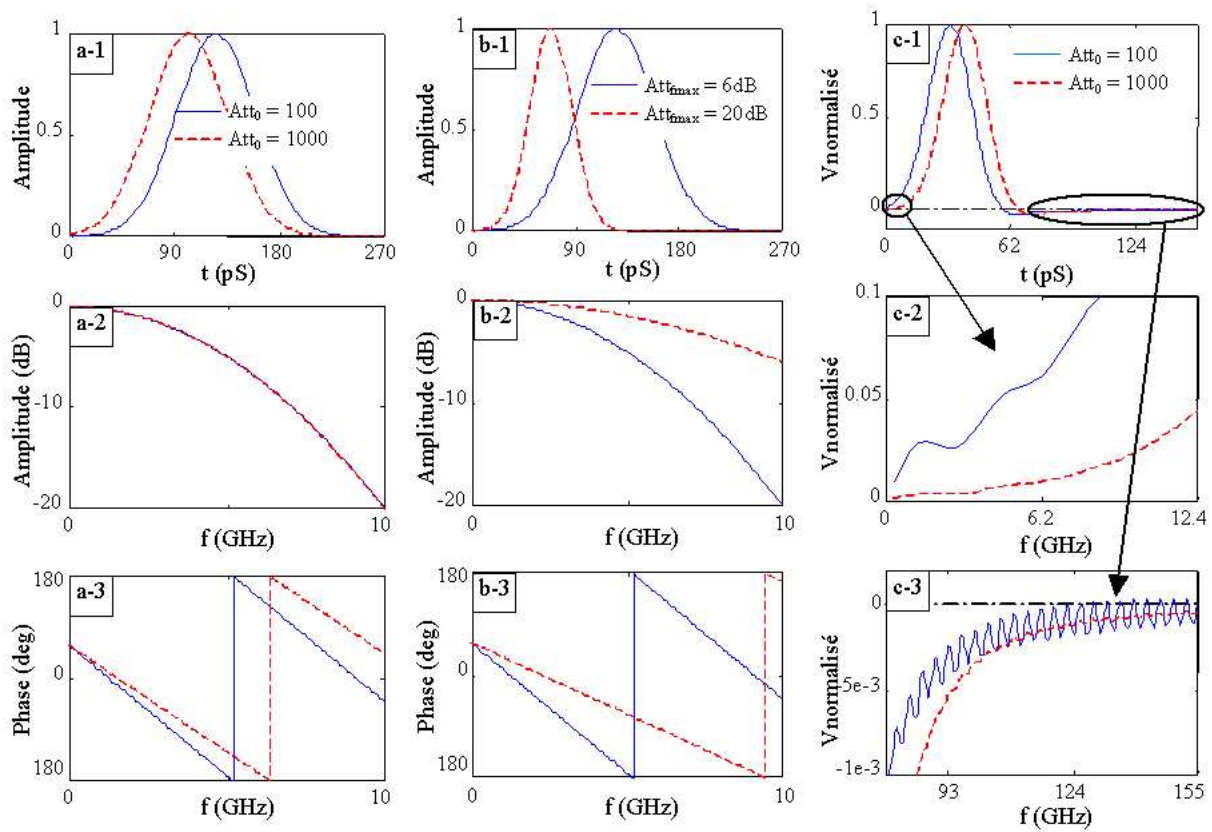


FIG. 7.2 – Réponse temps-fréquence de la gaussienne sous une piste imprimée au dessus d'un plan de masse pour deux valeurs de t_0 (cas a), deux atténuations à $f_{max} = 10$ GHz (cas b). Cas c : comportement de la gaussienne pour deux valeurs de t_0 , tension prélevée entre une ligne μ -ruban et un plan de masse.

D'autre part, cette fonction permet de faire du déphasage constant large bande en insérant une phase constante dans la fonction sinus :

$$e(t) = A_0 \sin(2\pi f_0 t + \phi_0) e^{-\frac{(t-t_0)^2}{T^2}} \xrightarrow{TF} e(f) = A_0 \frac{T\sqrt{\pi}}{2} e^{j\phi_0} e^{-(\pi(f-f_0)T)^2}$$

Comme avec la fonction gaussienne, trois approches sont proposées pour sa caractérisation :

1. Le domaine d'étude est une bande de fréquence connue. Il suffit alors de la fixer et de donner l'atténuation aux deux fréquences extrêmes de la bande ($Att_{f_{max}}$) par rapport au maximum d'amplitude situé à $f = f_0$. Un paramètre indépendant est utilisé pour définir le pied de la gaussienne dans le domaine temporel comme dans le cas de la gaussienne. De ces données, les paramètres t_0 et T sont directement déduits :

$$T = \frac{\sqrt{\ln(Att_{f_{max}})}}{\pi \Delta f} \quad \text{et} \quad t_0 = T \sqrt{\ln(Att_0)}$$

2. La durée de la partie gaussienne de la fonction dans le domaine temporel est connue. Dès lors, les formules définissant t_0 et T sont celles de la fonction gaussienne dans la même situation.
3. Le temps de montée t_m de la gaussienne doit être fixé. Dans ce cas, les paramètres t_0 et T sont définis par les même relations que la fonction gaussienne dans la même situation.

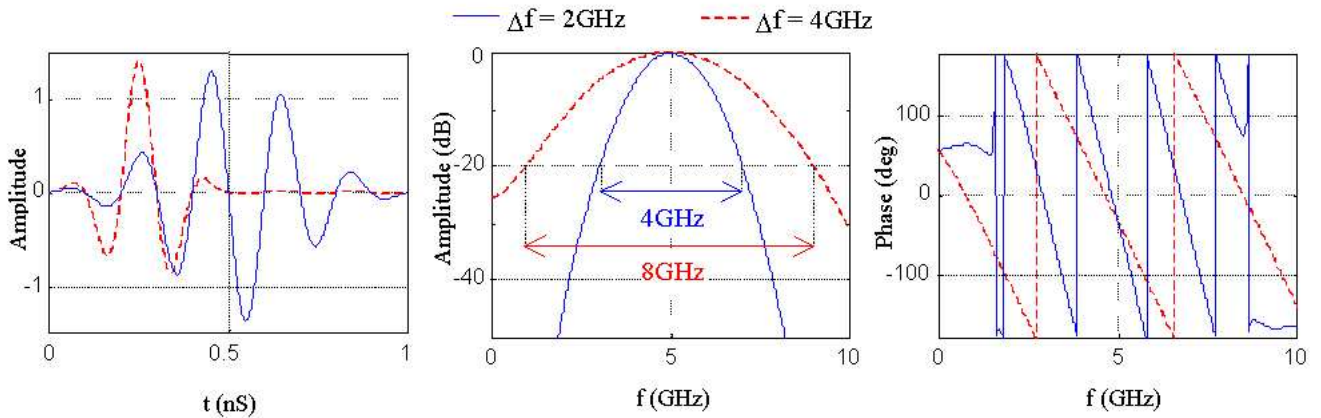


FIG. 7.3 – Réponse temps-fréquence de deux sino-gaussiennes, $dt = 1,83 \text{ ps}$; $f_0 = 5 \text{ GHz}$; $Att_0 = 100$; $Att_{f_{max}} = 10$.

Dérivée de la gaussienne

Ses formes, temporelle et fréquentielle, sont définies par les relations :

$$e(t) = -2A_0 \left(\frac{t-t_0}{T} \right) e^{-\frac{(t-t_0)^2}{T^2}} \xrightarrow{TF} e(f) = jA_0 2\pi^{\frac{3}{2}} f T^2 e^{-(\pi f T)^2} e^{-j2\pi f t_0}$$

La particularité de cette fonction tient à sa forte réjection des basses fréquences et du continu (figure 7.4). La conséquence directe est une valeur moyenne quasiment nulle. Comme avec la fonction gaussienne, trois approches sont proposées pour sa caractérisation :

1. Le domaine d'étude est une bande de fréquence connue. Il suffit alors de fixer la fréquence maximale utile (f_{max}) et l'atténuation à f_{max} ($Att_{f_{max}}$) par rapport au maximum d'amplitude. La détermination des paramètres t_0 et T , en fonction des paramètres $Att_{f_{max}}$, f_{max} et Att_0 est modifiée par rapport à la fonction gaussienne. En outre, aucune relation analytique n'a été trouvée. C'est pourquoi nous proposons des relations empiriques qui se conforment avec une bonne précision à la forme désirée :

$$T = \frac{\sqrt{\ln(5, 5Att_{f_{max}})}}{\pi f_{max}} \quad \text{et} \quad t_0 = T \sqrt{\ln(2, 5Att_0 \sqrt{\ln(2, 5Att_0)})}$$

2. La durée de la gaussienne dans le domaine temporel est connue. Les formules appliquées pour le calcul des paramètres t_0 et T sont :

$$t_0 = t_{max}/2 \quad \text{et} \quad T = t_0 / \sqrt{\ln(2, 5Att_0 \sqrt{\ln(2, 5Att_0)})}$$

3. Le temps de montée t_m doit être fixé. Dans ce cas, les paramètres t_0 et T sont définis par les relations :

$$T = \frac{t_m}{\sqrt{\ln(10)} - \sqrt{\ln(10/9)}} \quad \text{et} \quad t_0 = T \sqrt{\ln(2, 5Att_0 \sqrt{\ln(2, 5Att_0)})}$$

Le maximum positif de la fonction dérivée gaussienne est atteint pour l'instant $t_1 = t_0 - T/\sqrt{2}$ soit :

$$E_{max} = e(t_1) = A_0 \sqrt{\frac{2}{e}}$$

.

L'amplitude maximale du module de la fonction en fréquence et la fréquence associée sont définies par :

$$f_0 = \frac{1}{\pi T \sqrt{2}} \quad \text{et} \quad E_{max,f} = e(f_0) = T \sqrt{\frac{2\pi}{e}}$$

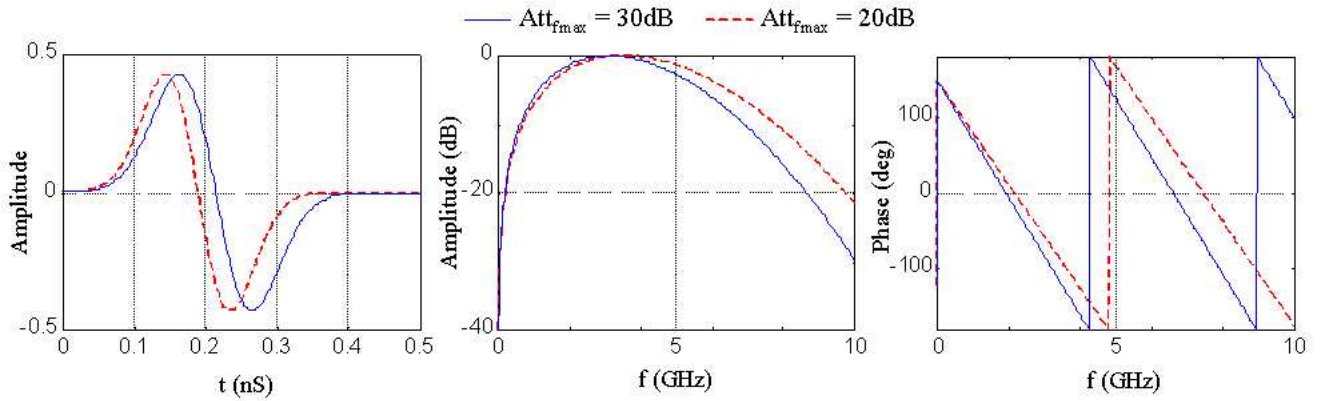


FIG. 7.4 – Réponse temps-fréquence de deux dérivées de la gaussienne, $\Delta t = 1,83ps$; $f_{max} = 10 \text{ GHz}$; $Att_0 = 1000$.

Ondelette de rayleigh

Ses formes, temporelle et fréquentielle, sont définies par les relations :

$$e(t) = R_e \left\{ \frac{e^{j\alpha}}{\left[j + \frac{2\pi f_0(t-t_0)}{N} \right]^{N+1}} \right\} \xrightarrow{TF} e(f) = ?$$

L'ondelette de Rayleigh est souvent citée dans les applications radars. La première de ses caractéristiques est une forte réjection des basses fréquences (figure 7.5). Deux paramètres dictent la forme de l'impulsion : la fréquence f_0 qui correspond au maximum d'amplitude et l'ordre N qui va fixer la largeur de l'impulsion temporelle. Le retard t_0 dépend de l'amplitude du pied de la fonction dans le domaine temporel. Il dépend de l'atténuation Att_0 de la fonction à $t = 0$ par rapport au maximum d'amplitude :

$$t_0 = \frac{N}{2\pi f_0} Att_0^{\frac{1}{N+1}}$$

En faisant varier le paramètre de phase α , on fait varier le déphasage d'un angle constant sur une large bande de fréquence (figure 7.5). Cette fonction peut-être utilisée pour faire par exemple de la polarisation circulaire ou elliptique large bande. Par défaut $\alpha = 0$.

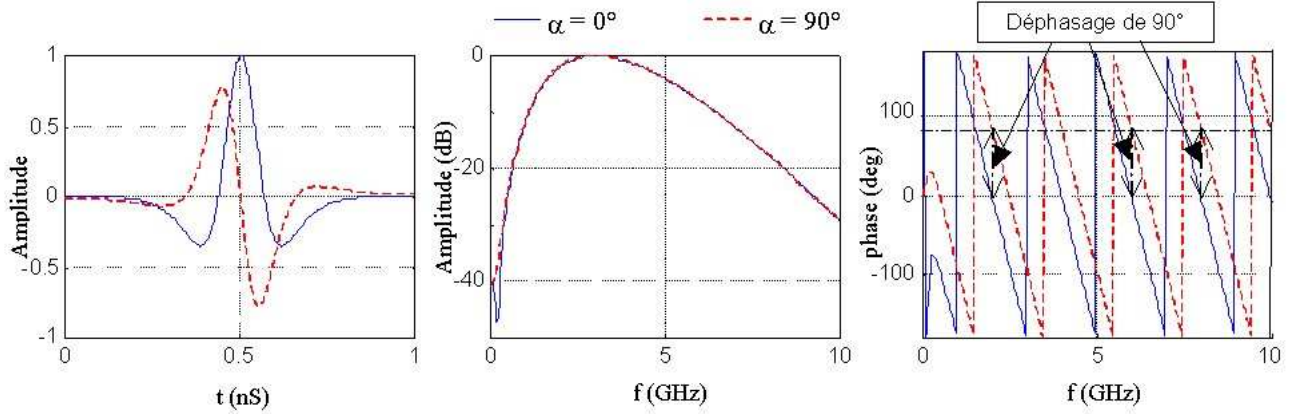


FIG. 7.5 – Réponse temps-fréquence de deux ondelette de Rayleigh déphasées de 90° ; $\Delta t = 1,83$ ps; $f_0 = 3$ GHz; $Att_0 = 100$.

Bi-exponentielle

La fonction temporelle de la bi-exponentielle est définie par la relation suivante :

$$e(t) = A_0 \frac{(e^{-at} - e^{-bt})}{anorm}$$

avec :

$$\begin{aligned} a &= \ln(2)/D \\ b &= \ln(9)/t_m \\ anorm &= e^{-at_0} - e^{-bt_0} \\ t_0 &= \frac{\ln(b/a)}{b-a} \end{aligned}$$

t_m est le temps de montée, D la largeur à mihauteur, t_0 l'instant où $e(t)$ est maximum si bien que $e(t_0) = A_0$

Echelon exponentiel

Ses formes, temporelle et fréquentielle, sont définies par les relations :

$$e(t) = A_0 \left(1 - e^{-\frac{t}{\text{pente}}}\right) \xrightarrow{TF} e(f) = A_0 \delta(f) \dots \text{à vérifier}$$

Si le temps de montée t_m est donné alors la pente est déduite par la relation :

$$\text{pente} = t_m / \ln(9)$$

Sinus

La fonction sinus est définie classiquement par :

$$e(t) = \sin(2\pi f_0 t)$$

Pulse Sinus

La fonction « pulse sinus » est une fonction sinus tronquée par une fenêtre non rectangulaire définie par la relation :

$$\begin{aligned}
 H(t) &= \sin^2\left(\frac{\pi t}{t_m}\right) && \text{pour } t \leq t_m \\
 &= 1 && \text{pour } t_m \leq t \leq \text{duree} - t_m \\
 &= \sin^2\left(\frac{\pi t}{t_m}\right) && \text{pour } \text{duree} - t_m \leq t \leq \text{duree} \\
 &= 0 && \text{pour } \text{duree} \leq t
 \end{aligned}$$

Trois paramètres définissent la fonction « pulse sinus » : la fréquence du sinus f_0 , le temps de montée t_m et la durée de l'impulsion. En outre, un retard t_r et une phase ϕ peuvent être insérés lors de la définition de la source d'excitation. La fonction source est de la forme :

$$e(t - t_r) = \sin(2\pi f_0 t + \phi) \cdot H(t)$$

La figure 7.6 est un exemple typique de la fonction « pulse sinus » comparée à une fonction « sinus » tronquée par une fonction « rectangle ». Le pied de la montée initiale de l'impulsion et celle de la descente finale possèdent une pente nulle. Dès lors, la propagation de l'impulsion n'est pas perturbée par des oscillations parasites et ainsi le régime permanent s'établit plus rapidement.

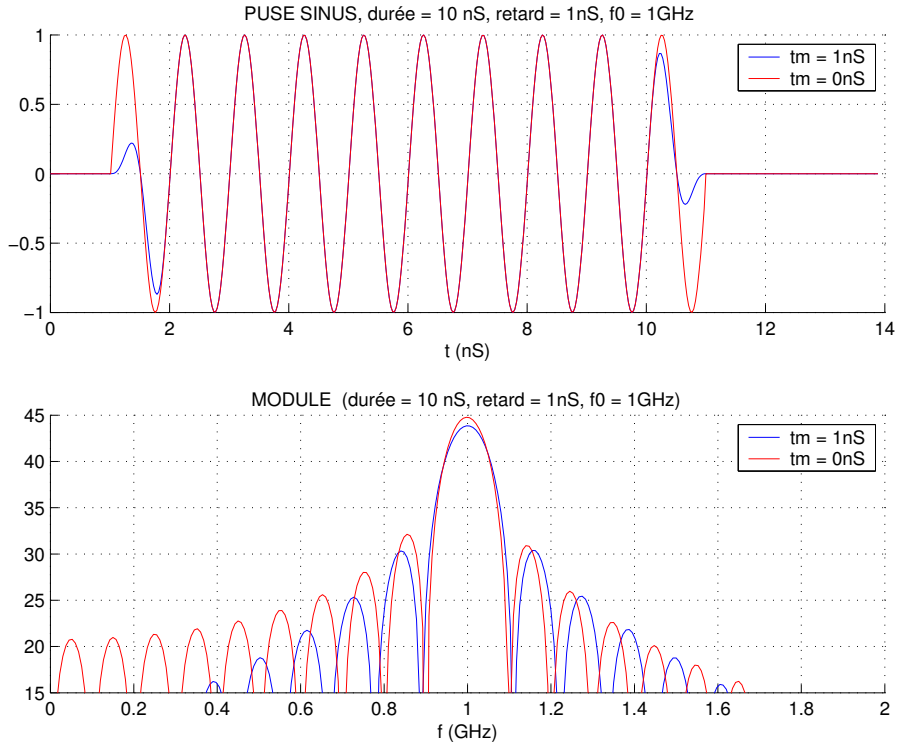


FIG. 7.6 – Réponse temps fréquence d'une fonction sinus avec une fenêtre rectangulaire ($t_m = 0$) et d'une fonction « pulse sinus ».

iemn exponentielle quotient

La fonction impulsion électromagnétique d'origine nucléaire est définie par la formule suivante :

$$e(t) = \left(\frac{\alpha}{\beta}\right)^{\frac{\beta}{\alpha+\beta}} \left(\frac{\alpha+\beta}{\alpha}\right) \frac{e^{\alpha(t-t_0)}}{1 + e^{(\alpha+\beta)(t-t_0)}}$$

$$\text{si } \alpha(t - t_0) \geq 20 \text{ alors } e(t) = \left(\frac{\alpha}{\beta}\right)^{\frac{\beta}{\alpha+\beta}} \left(\frac{\alpha + \beta}{\alpha}\right) e^{(-\beta(t-t_0))}$$

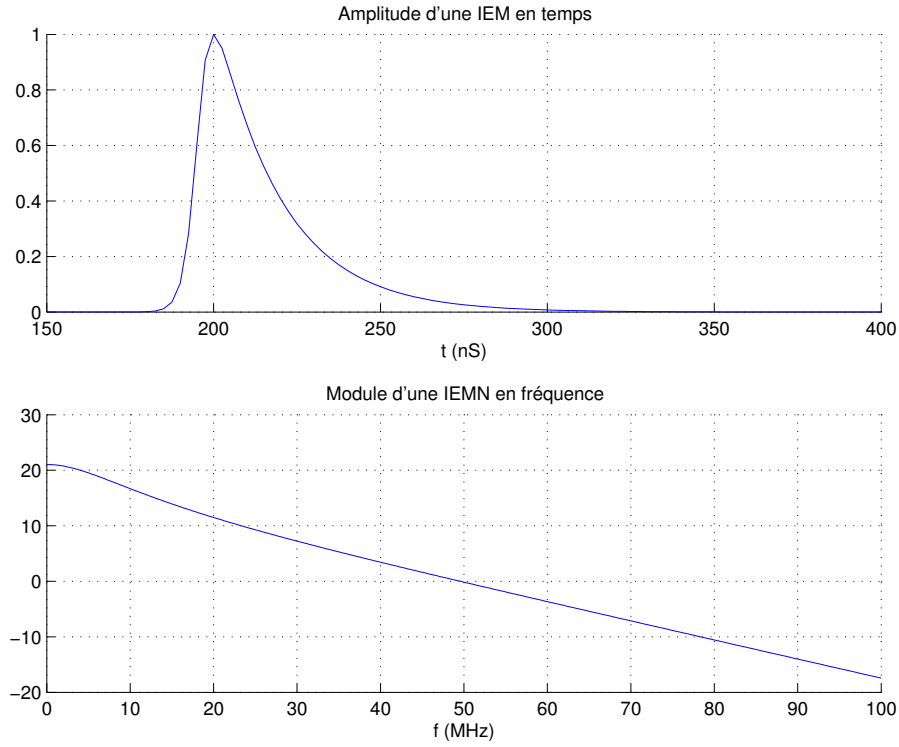


FIG. 7.7 – Réponse temps fréquence d'une IEMN.

Fonction foudre Heidler

Cette fonction est définie comme suit :

$$e(t) = \sum_{n=1}^M \frac{I_n}{\eta_n} \frac{\alpha_n^{N_n} t^{N_n}}{\alpha_n^{N_n} t^{N_n} + 1} e^{-\beta_n t}$$

M est le nombre de termes de la fonction de Heidler. La figure 7.8 illustre le comportement de la fonction avec un temps de montée très bref et une longue décroissance du signal en temporel.

FIG. 7.8 – Réponse temporelle et fréquentielle d'une fonction foudre de Heidler

Chapitre 8

Post-traitement - Résultats

Cette partie présente les blocs qui permettent de calculer et stocker les résultats de simulation. Deux blocs sont particuliers :

- Le bloc `temps_fréquence` qui doit être défini avant les autres puisque il contient la définition des intervalles en temps et en fréquence pour les résultats.
- Le bloc `fichier_sortie` qui définit le format des fichiers de sortie.

Deux autres blocs sont aussi spéciaux car ils ne concernent pas l'instant que le champ lointain :

- Le bloc `zone_angulaire` pour la définition de zones angulaires de rayonnement.
- le bloc `surface_huygens`.

Tous les autres blocs concernent directement la sortie des résultats.

8.1 Fichier de sortie, `<fichier_sortie>`

8.1.1 Rôle - syntaxe

Ce bloc peut être placé n'importe où dans le fichier de données d'entrée. Il est optionnel. Par défaut, le stockage se fait au format ASCII, le plus simplement possible, et il n'y a pas d'autres formats pour l'instant. Il offre les possibilités suivantes :

- Définition d'une extension unique sur les noms des fichiers résultats.
- Définition du format pour les réels et les entiers

Syntaxe et signification (identifiants de base)

extension `$C_nom_extension`

-> Extension pour tous les fichiers résultats. Le nom de l'extension peut comporter jusqu'à 40 caractères.

Ne pas mettre le point. Par défaut, l'extension est *dat*.

mantisse_reel \$C_mantisse

-> Format pour tous les réels stockés. C'est une chaîne de caractères qui décrit le format au sens de Fortran 90. Par défaut, le format est `ES16.7E3`, ca veut dire que la mantisse d'un réel est en format scientifique, avec une longueur de 16 caractères (qui doit contenir au moins un blanc), avec 7 chiffres après la virgule et 3 chiffres de précision pour l'exposant (hors signe). Le nombre de chiffres peut être revu fortement à la baisse pour de gros stockages qui ne nécessitent pas en outre une représentation avec une forte dynamique. Voici la syntaxe générale des descripteurs Fortran 90 pour les réels (voir la documentation sur le Fortran 90 pour plus de détails sur les formats) :

Fw.d Réel en notation flottante

Ew.d[Ee] Réel en notation exponentielle (lettre E pour l'exposant)

Dw.d Réel en notation exponentielle (lettre D pour l'exposant)

Gw.d[Ee] Réel en notation flottante ou exponentielle suivant sa valeur

ENw.d[Ee] Réel en notation ingénieur (exposant multiple de 3)

ESw.d[Ee] Réel en notation scientifique

mantisse_entier \$C_mantisse

-> Format pour tous les entiers stockés. C'est une chaîne de caractères qui décrit le format au sens de Fortran 90. Par défaut, le format est `I7`, ca veut dire que la mantisse d'un entier a 7 chiffres (hors signe).

Blocs requis : aucun

Ordre - Règle d'apparition

Exemple classique :

Le changement d'extension est très souvent utilisé pour éviter d'écraser des fichiers déjà existant. Il est à noter que TRIDIMO s'arrête si le nom d'un fichier résultat existe déjà. D'autre part, pour les machines dont les réels sont en « simple précision » ou codés sur 32 bits, il est inutile d'avoir une précision de l'exposant sur 3 chiffres.

```
<fichier_sortie
# changement extension, s'applique à tous les fichiers de sortie
extension    dt1
# Réduction de la précision de l'exposant
mantisse_reel ES16.7E2
fichier_sortie>
```

Exemple 2

Différents formats sur les réels.

```
<fichier_sortie
# Format Ingénieur
mantisse_reel EN16.7E2
# Format Flottant
mantisse_reel G16.7
fichier_sortie>
```

8.2 Intervalles et liste temps-fréquence, <temps_frequence>

8.2.1 Rôle - syntaxe

Avant de décrire les résultats désirés de la simulation, les intervalles d'étude en temps et en fréquence doivent être déclarés et définis au préalable dans le bloc <temps_frequence>. Les types d'intervalles proposés peuvent s'appliquer à la plupart des types de résultats. Ceci sera précisé pour chacun d'entre eux.

- Intervalles en temps ou en fréquence.
- Listes d'instants en temps ou en fréquence.
- On peut définir autant d'intervalles ou de listes que l'on veut.
- Réglage de la fréquence d'échantillonnage de la transformée de Fourier.

Syntaxe et signification (identifiants de base)

IF\$nom \$R_{\$f_{min}} \$R_{\$f_{max}} \$R_{\$f_{pas}}

-> Déclaration et définition d'un intervalle en fréquence. **IF\$nom** est le nom de l'intervalle en fréquence et **IF** est l'identifiant.

f_{min} : fréquence minimale de l'intervalle en hertz.

f_{max} : fréquence maximale de l'intervalle en hertz ($f_{max} > f_{min}$).

f_{pas} : le pas de fréquence en hertz (valeur positive non nulle).

IL\$nom \$R_{\$f_{min}} \$R_{\$f_{max}} \$I_{\$nb_ech_par_decade}

-> Déclaration et définition d'un intervalle logarithme fréquence. **LF\$nom** est le nom de l'intervalle en fréquence et **LF** est l'identifiant. Cet intervalle est très intéressant lorsque l'on veut avoir une réponse en fréquence sur plusieurs décade car le nombre d'échantillons par décade est fixe et le pas de fréquence change d'une décade à l'autre. Toutefois, l'approche proposée impose un pas de fréquence constant sur une décade.

f_{min} : fréquence minimale de l'intervalle en hertz ($f_{min} > 1e-6$).

f_{max} : fréquence maximale de l'intervalle en hertz ($f_{max} > f_{min}$).

$nb_ech_par_decade$: le nombre d'échantillons pour chaque décade complète

Si la décade n'est pas complète, c'est à dire si f_{min} ou f_{max} ne sont pas des puissances de 10 alors le nombre d'échantillons sur la ou les décades incomplètes seront inférieurs à celui demandé. En fait, à partir du nombre d'échantillons par décade est fixé le pas fréquentiel : si par exemple, le nombre d'échantillon est fixé à 20 par décade alors il déduit automatiquement que le pas de fréquence de la décade $[10^n - 10^{n+1}]$ est : $\Delta f = 10^{n+1}/20$.

LF\$nom \$R_{\$f_1} \$R_{\$f_2} \$R_{\$f_3} ...

-> Déclaration et définition d'une liste de fréquences. **LF\$nom** est le nom de la liste de fréquences et **LF** est l'identifiant.

$f_1, f_2, f_3 \dots$ sont les valeurs de la liste de fréquences en hertz.

IT\$nom [\$R_{\$t_{min}} \$R_{\$t_{max}} \$R_{\$t_{pas}}]

-> Déclaration et définition d'un intervalle temporel. **IT\$nom** est le nom de l'intervalle en temps et **IT** est l'identifiant.

t_{min} : temps initial de l'intervalle en seconde.

t_{max} : temps final de l'intervalle en seconde.

t_{pas} : le pas temporel de stockage en seconde.

Voici quelques règles à retenir :

- Si $t_{pas} < \Delta t$ alors $t_{pas} = \Delta t$, Δt le pas temporel FDTD.

- Si $t_{min} < 0$ alors $t_{min} = 0$.
- Si $t_{max} > \text{duree_totale}$ alors $t_{max} = \text{duree_totale}$ (cf. §?? pour duree_totale).

Les trois arguments t_{min} , t_{max} et t_{pas} sont optionnels. Si les trois sont absents alors l'intervalle correspond à la durée totale de la simulation avec un pas d'échantillonnage égal à Δt : $t_{min} = 0$, $t_{max} = \text{duree_total}$, $t_{pas} = \Delta t$.

LT\$nom \$R_{t_1}\$ \$R_{t_2}\$ \$R_{t_3}\$...

-> Déclaration et définition d'une liste d'instantanés temporels. **LT\$nom** est le nom de la liste d'instantanés et **LT** est l'identifiant.

t_1 , t_2 , t_3 ... sont les valeurs de la liste d'instantanés en seconde.

Si un instantané temporel est inférieur à 0 ou supérieur à la durée de simulation alors il n'y aura pas de résultats pour cet instant !

Syntaxe et signification (identifiants particuliers)

Dans la méthode FDTD, les signaux sont sur-échantillonnés en temps (au moins 10 échantillons pour la fréquence maximale autorisée et en général beaucoup plus). Pour gagner du temps en calcul dans l'application de la transformée de Fourier discrète, un sous-échantillonnage est appliqué automatiquement avec une fréquence d'échantillonnage (cf. §8.2.2) :

$$f_{ech} = 5f_{max} \text{ avec } f_{max} = \frac{c}{\lambda_{min}} = c / (10 \max(\Delta x, \Delta y, \Delta z)) \quad (8.1)$$

Ceci peut-être rectifié en réglant vous même la fréquence d'échantillonnage. Plusieurs possibilités sont offertes :

frequence_ech \$R_{f_{ech}}

-> la fréquence d'échantillonnage pour la transformée de Fourier. La valeur s'applique à tous les intervalles en fréquence définis en dessous de cette ligne (jusqu'au prochain contre-ordre). Nous rappelons que la fréquence d'échantillonnage doit être calculée par rapport à la bande spectrale de la fonction source, et non par rapport aux intervalles de stockage !

Le pas d'échantillonnage réel en temps est déduit de la manière suivante :

$$dt_{ech} = \max \left\{ \Delta t, \Delta t \times \text{INT} \left(\frac{1}{f_{ech} \Delta t} \right) \right\}$$

echantillon_fmax **auto**

echantillon_fmax **tous**

echantillon_fmax \$I_{nb-echantillon}

-> Réglage de l'échantillonnage temporel pour la transformée de Fourier. Le réglage s'applique à tous les intervalles en fréquence définis en dessous de cette ligne (jusqu'au prochain contre-ordre) :

auto : l'équation 8.1 est appliquée (cas par défaut).

tous : tous les échantillons en temps sont retenus ($dt_{ech} = \Delta t$).

nb-echantillon : échantillonnage temporel suivant la formule : $dt_{ech} = \text{nb-echantillon} \times \Delta t$.

ecrit_base 0
1

-> Ecriture des bases de temps et de fréquence défini au sein de ce bloc dans des fichiers spécifiques si la valeur de **ecrit_base** est à 1. En l'absence de cet identifiant, ces fichiers ne sont pas créés (équivalent à « **ecrit_base** 0 »).

Blocs requis : aucun

Ordre - Règle d'apparition

Le bloc <temps_frequence> doit être défini avant tous les autres blocs de résultats présentés dans les paragraphes suivants.

Exemple classique :

```
<temps_frequence
  IFbande1 0 10e9 0.05e9 # 0 à 10 GHz par pas de 50 MHz
  LFechantillons1 1e9 2e9 3e9 4e9 # une liste de 3 fréquences
  ITintervalle1 0 10e-9 0 # 0 à 10 nS avec un pas  $\Delta t$ .
  LTinstants1 1e-9 2e-9 3e-9 # une liste de 3 instants
  ITintervalle_complet
temps_frequence>
```

Exemple 2 : sous-échantillonnage

```
<temps_frequence
  frequence_ech 40e9 #  $f_{ech} = 40$  GHz
  LF1 500e6 2e9 5e9
  echantillon_fmax auto #  $f_{ech} = 5f_{max}$  avec  $f_{max} = c / (10 \max(\Delta x, \Delta y, \Delta z))$ 
  IFbande1 0 10e9 0.05e9
  echantillon_fmax 10 #  $f_{ech} = 10/\Delta t$ 
  IFbande2 0 5e9 0.05e9
  echantillon_fmax tous #  $f_{ech} = 1/\Delta t$ 
temps_frequence>
```

8.2.2 Informations complémentaires

TFD ou FFT

L'algorithme FFT est la plupart du temps employé pour calculer la transformée de Fourier d'un signal temporel. Il est tout simplement plus performant que la simple transformée de Fourier discrète (TFD) à nombre égal d'échantillons en fréquence calculés. Cependant, avec la méthode FDTD, la TFD est souvent plus attrayante comme expliqué par Furse et Gandhi [?]. La première raison est liée à une économie de mémoire. En effet, l'algorithme TFD présente une procédure de sommation à chaque itération temporelle des valeurs des champs pour les fréquences désirées. Cette procédure est incontournable dans certains cas comme le calcul d'une cartographie de champ ou le calcul du champ lointain en fréquence, car un stockage temporel risque de provoquer tout simplement la saturation de la capacité mémoire des calculateurs. Dès lors, la FFT ne peut pas s'appliquer. En outre, pour une réponse qui nécessite peu de fréquences, il faudra choisir avec la FFT une fréquence d'échantillonnage suffisamment petite afin de minimiser l'erreur sur la valeur de la fréquence la plus faible. Une erreur de 1% sur la fréquence la plus petite nécessite une fréquence d'échantillonnage de $f_{min}/100$. D'où un temps de calcul et une taille mémoire qui est, là encore, inutilement conséquente.

Une deuxième raison est liée à la faible bande d'étude possible par rapport à la bande de fréquence fournie par la FFT. En effet, cette dernière va produire un nombre d'échantillons sur une bande de $1/\Delta t$. Or dans le cas le plus favorable pour la FFT où on prend un échantillonnage spatial grossier en $\lambda_{min}/10$ et où l'on considère un pas temporel égal à $0,5\Delta_{3D}/c$, la bande de fréquences calculée par la FFT sera 20 fois supérieure à la bande valide $[0, f_{max} = 1/\lambda_{min}]$. Un peu exorbitant n'est ce pas ?

La mise en oeuvre de la TFD dans TRIDIMO applique la relation :

$$\hat{g}(f) = \sum_{n=0}^{N_{iter}-1} g(n\Delta t) e^{-i2\pi n dt_{ech} f} dt_{ech}$$

Avec $N_{iter} = \text{duree_totale}/dt_{ech}$, dt_{ech} : le pas d'échantillonnage pour la TFD.

Sous-échantillonnage

L'échantillonnage spatial minimal imposé par la FDTD ($\Delta_{3D} \leq \lambda_{min}/10$) entraîne de par le critère de stabilité ($\Delta t \sim 0,5\Delta_{3D}/c$), une fréquence d'échantillonnage ($1/\Delta t$) 10 fois supérieur à $f_{max} = c/\lambda_{min}$. On peut donc augmenter sans pertes de précision pour la TF le pas d'échantillonnage temporel et obtenir ainsi une réduction substantielle du temps de calcul par TFD. Par défaut, le pas d'échantillonnage est calculé de la manière suivante :

$$f_{ech} = 5f_{max} \text{ avec } f_{max} = c/(10 \max(\Delta x, \Delta y, \Delta z)) \quad (8.2)$$

$$dt_{ech} = \max \left\{ \Delta t, \Delta t \times \text{INT} \left(\frac{1}{f_{ech}\Delta t} \right) \right\} \quad (8.3)$$

Cependant, il ne faut pas perdre de vue que la fréquence d'échantillonnage doit être supérieure au moins à 2 fois la fréquence maximale du spectre d'excitation (et non la fréquence maximale d'étude ou la fréquence maximale imposée par le critère d'échantillonnage spatial). C'est pourquoi une marge est prise par rapport à la fréquence maximale imposée par le critère d'échantillonnage spatial. La fréquence maximale d'excitation est aussi liée au temps de montée t_m . Pour une gaussienne, on a $f_{max} = 1/(2t_m)$ avec un niveau à f_{max} atténué de 10 par rapport au maximum d'amplitude.

8.3 Zone angulaire, <zone_angulaire>

8.3.1 Rôle - syntaxe

Ce bloc est indispensable pour le calcul du champ lointain. Actuellement, Il n'est pas utilisé pour d'autres modules. La déclaration et la définition des zones angulaires de rayonnement sont réalisées dans ce bloc. Les zones angulaires sont définies avec les angles θ et ϕ des coordonnées sphériques (voir figure ??). Les possibilités sont :

- Zones angulaires bidimensionnelles plan θ , ϕ fixé ou plan ϕ , θ fixé.
- Listes d'angles θ, ϕ fixé ou ϕ , θ fixé.
- Zones angulaires tridimensionnelles suivant ϕ et θ à la fois.

Syntaxe et signification (identifiants de base)

ITH\$nom \$R_{\theta_{min}}\$ \$R_{\theta_{max}}\$ \$R_{\theta_{pas}}\$ \$R_{\phi_1}\$ [\$R_{\phi_2}\$ [\$R_{\phi_3}\$...

-> Déclaration et définition d'une zone angulaire de plans θ . La zone varie de θ_{min} à θ_{max} par pas de θ_{pas} . Il y a autant d'intervalles suivant θ que de valeurs de ϕ ($\phi_1, \phi_2, \phi_3...$). Autrement dit, l'intervalle défini suivant θ s'applique pour chaque angle ϕ donné. L'ensemble des intervalles constitue la zone angulaire **ITH\$nom**. Tous les angles sont exprimés en degré.

IPH\$nom \$R_{\phi_{min}}\$ \$R_{\phi_{max}}\$ \$R_{\phi_{pas}}\$ \$R_{\theta_1}\$ [\$R_{\theta_2}\$ [\$R_{\theta_3}\$...

-> Déclaration et définition d'une zone angulaire de plans ϕ . La zone varie de ϕ_{min} à ϕ_{max} par pas de ϕ_{pas} . Il y a autant d'intervalles suivant ϕ que de valeurs de θ ($\theta_1, \theta_2, \theta_3...$). Autrement dit, l'intervalle défini suivant ϕ s'applique pour chaque angle θ donné. L'ensemble des intervalles constitue la zone angulaire **IPH\$nom**. Tous les angles sont exprimés en degré.

ITP\$nom \$R_{\theta_{min}}\$ \$R_{\theta_{max}}\$ \$R_{\theta_{pas}}\$ \$R_{\phi_{min}}\$ \$R_{\phi_{max}}\$ \$R_{\phi_{pas}}\$

-> Déclaration et définition d'une zone angulaire tridimensionnelle. La zone varie de θ_{min} à θ_{max} par pas de θ_{pas} dans le plan θ et de ϕ_{min} à ϕ_{max} par pas de ϕ_{pas} dans le plan ϕ . Tous les angles sont exprimés en degré.

LTH\$nom \$R_{\phi}\$ \$R_{\theta_1}\$ [\$R_{\theta_2}\$ [\$R_{\theta_3}\$...

-> Déclaration et définition d'une zone angulaire qui correspond à une liste d'angles θ avec un angle ϕ fixé. Tous les angles sont exprimés en degré.

LPH\$nom \$R_{\theta}\$ \$R_{\phi_1}\$ [\$R_{\phi_2}\$ [\$R_{\phi_3}\$...

-> Déclaration et définition d'une zone angulaire qui correspond à une liste d'angles ϕ avec un angle θ fixé. Tous les angles sont exprimés en degré.

Blocs requis : aucun

Ordre - Règle d'apparition

Exemple classique :

```
<zone_angulaire
# Intervalle plan  $\theta$  :(0 180 par pas de 2.5),  $\phi = 0^\circ$  et  $90^\circ$ 
ITH 0.0 180.0 2.5 0.0 90.0
# Liste d'angles  $\theta$ ,  $\phi = 45^\circ$ 
LTH 45.0 0 10 30 60

# Intervalle plan  $\phi$  :(0 180 par pas de 5),  $\theta = 0^\circ$  et  $90^\circ$ 
```

```
IPH 0.0 180.0 5.0 0.0 90.0
# Liste d'angles  $\phi$ ,  $\theta = 45^\circ$ 
LPH 45.0 0 10 30 60
# Zone angulaire tridimensionnelle, la sphère est couverte pas pas de 5°
# plan  $\theta$  : (0 180 par pas de 5), plan  $\phi$  : (0 360 par pas de 5)
ITP 0 180 5 0 360 5
zone_angulaire>
```

8.4 Formats de stockage en fréquence et normalisation en fréquence

8.4.1 Format de stockage

Le champ complexe en fréquence peut se présenter dans les fichiers de résultats sous différents formats :

```
reelle_imaginaire # c'est le format par défaut
module_phase     # phase en degré
module_db_phase  # phase en degré
module_seul
module_db
```

-> Les noms de formats sont explicites. La phase est en degré. Ces mots-clé sont appliqués dans les blocs de résultats présentés aux paragraphes suivants. Les formats s'appliquent à tous les paramètres de sortie de TRIDIMO décrits dans les blocs résultats, définis en dessous de l'identifiant format et jusqu'à la redéfinition suivante du format au sein du même bloc.

8.4.2 Normalisation en fréquence

La normalisation concerne que les réponses en fréquence. Elle peut s'appliquer dans tous les blocs de résultats lorsque cela est indiqué explicitement dans les paragraphes suivants. Elle permet de normaliser les réponses en fréquence par rapport aux spectres d'une fonction source définie qui devrait correspondre évidemment à la fonction employée pour l'excitation (la réponse en fréquence est divisée par le spectre de la fonction indiquée). La ligne suivante permet d'appliquer la normalisation au sein d'un bloc à tous les résultats spécifiés en dessous.

```
normalisation_freq $C_nom_fonction_source [$R_Amax [$R_phase [$R_retard]]]
```

-> Défini une normalisation dans un bloc résultat pour tous les résultats définis en dessous (valide au sein du bloc jusqu'au prochain contre-ordre) :

nom_fonction_source : nom de la fonction d'excitation déclaré dans le bloc <fonction_source> qui doit être défini auparavant.

A_0 : amplitude appliquée à la fonction source en temporel. Cet argument est optionnel et vaut 1,0 par défaut.

phase : phase en degré de la fonction source. Cet argument est optionnel. Par défaut, elle vaut 0°. La phase s'applique que pour certaines fonctions sources (voir 7.2.2).

retard : retard en seconde appliqué sur la fonction source de nom \$C_nom_fonction_source. Par défaut, il vaut 0 s. Cet argument est optionnel.

```
non_normalisation_freq
```

-> Désactive une normalisation dans un bloc résultat pour tous les résultats définis en dessous (valide au sein du bloc jusqu'au prochain contre-ordre)