

Guide de l'utilisateur de Open TEMSI-FD  
(Time ElectroMagnetic Simulator - Finite Difference)  
- anciennement TRIDIMO -  
version 1.0

Christophe GUIFFAUT

Mars 2007



# Table des matières

<b>1</b>	<b>Introduction</b>	<b>7</b>
<b>2</b>	<b>Historique</b>	<b>9</b>
<b>3</b>	<b>Utilisation de TEMSI-FD</b>	<b>13</b>
<b>4</b>	<b>Syntaxe du manuel</b>	<b>15</b>
<b>5</b>	<b>Etapes d'une modélisation</b>	<b>17</b>
<b>6</b>	<b>Occupation mémoire et temps de calcul</b>	<b>21</b>
6.1	Mémoire . . . . .	21
<b>7</b>	<b>Les constantes scientifiques</b>	<b>23</b>
<b>8</b>	<b>Exemples de base</b>	<b>25</b>
8.1	Propagation 1D . . . . .	25
8.2	Onde plane, espace 2D . . . . .	26
8.3	Monopole . . . . .	27
<b>9</b>	<b>Volume de calcul - Frontière - Surface de Huygens</b>	<b>29</b>
9.1	Volume de calcul, <volume_calcul> . . . . .	29
9.1.1	Rôle et syntaxe . . . . .	29
9.1.2	Informations complémentaires . . . . .	31
9.2	Frontière, <frontieres> . . . . .	34
9.2.1	Rôle et syntaxe . . . . .	34
9.2.2	Informations complémentaires . . . . .	36
9.3	Surface de Huygens, <surface_huygens> . . . . .	38

<b>10 Milieux - Structures</b>	<b>39</b>
10.1 Milieux simples et milieu_fractal <milieu_simple> . . . . .	39
10.1.1 Exemples . . . . .	39
10.1.2 Informations complémentaires . . . . .	43
10.2 Milieux dispersifs, <milieu_dispersif> . . . . .	44
10.2.1 Exemples . . . . .	44
10.3 Structures, <structure> . . . . .	46
10.3.1 Rôle et syntaxe . . . . .	46
10.3.2 Informations complémentaires . . . . .	52
<b>11 Fonctions d'excitation et sources</b>	<b>55</b>
11.1 Fonctions sources, <fonction_source> . . . . .	55
11.1.1 Exemples . . . . .	55
11.2 Ondes planes, <onde_plane> . . . . .	57
11.2.1 Rôle et fonction . . . . .	57
11.2.2 Informations complémentaires . . . . .	62
11.3 Source de tension, <source_tension> . . . . .	65
11.3.1 Rôle et syntaxe . . . . .	65
11.3.2 Informations complémentaires . . . . .	66
11.4 Source de courant, <source_courant> . . . . .	68
11.4.1 Rôle et syntaxe . . . . .	68
11.4.1.1 Informations complémentaires . . . . .	69
<b>12 Structures filaires</b>	<b>71</b>
12.1 Fils de Holland, <structure_fil> . . . . .	71
12.1.1 Rôle et syntaxe . . . . .	71
12.1.2 Informations complémentaires . . . . .	78

<b>13 Post-traitement - Résultats</b>	<b>81</b>
13.1 Fichier de sortie, <fichier_sortie> . . . . .	81
13.1.1 Exemples . . . . .	81
13.2 Intervalles et liste temps-fréquence, <temps_frequence> . . . . .	83
13.2.1 Exemples . . . . .	83
13.3 Zone angulaire, <zone_angulaire> . . . . .	84
13.3.1 Exemples . . . . .	84
13.4 Formats de stockage en fréquence et normalisation en fréquence . . . . .	85
13.4.1 Format de stockage . . . . .	85
13.4.2 Normalisation en fréquence . . . . .	85
13.5 Points d'observation en champ local, <resultat_champ_point> . . . . .	86
13.5.1 Rôle - syntaxe . . . . .	86
13.5.2 informations complémentaires . . . . .	88
13.6 Surface d'observation en champ local, <resultat_champ_surface> . . . . .	90
13.6.1 Rôle - syntaxe . . . . .	90
13.6.2 informations complémentaires . . . . .	91
13.7 Volume d'observation en champ local, <resultat_champ_volume> . . . . .	94
13.7.1 Rôle - syntaxe . . . . .	94
13.7.2 informations complémentaires . . . . .	94
13.8 Tension - Courant - Impédance <resultat_v_i_z> . . . . .	96
13.8.1 Rôle - syntaxe . . . . .	96
13.8.2 informations complémentaires . . . . .	98
13.9 Résultat des structures filaires . . . . .	100
13.9.1 Rôle - syntaxe . . . . .	100
13.9.2 informations complémentaires . . . . .	102
13.10 Résultat champ lointain en fréquence, <champ_lointain_frequence> . . . . .	104
13.10.1 Rôle - syntaxe . . . . .	104
13.10.2 informations complémentaires . . . . .	110



# 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). Si tu es débutant, va te farcir les bases de la FDTD de suite !

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 de TEMSI-FD, 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 5.

## Chapitre 2

# Historique

Le simulateur TRIDIMO (nom du simulateur donné au début du projet et jusqu'en 2006) a été initié au sein de l'équipe « Diffraction ElectroMagnétique » de l'IRCOM par C. GIRAUDON (étudiant en thèse) et C. GUIFFAUT (chargé de recherche CNRS) sous l'égide de A. REINEIX directeur de l'équipe et directeur de recherche au CNRS. A l'origine, des codes divers sur la méthode FDTD étaient écrits en Fortran (la plupart en Fortran 77). Un simulateur complet THESADE a été développé et orienté sur la modélisation d'antennes. Le besoin d'une part d'utiliser les formalismes numériques les plus récents, et d'autre part de répondre aux nouvelles voies de recherche de l'équipe (en CEM et RADAR), a conduit à la naissance d'un nouveau simulateur TRIDIMO. Le code a entièrement été développé en Fortran 90, il est ainsi portable sur toutes les machines dédiées au calcul. Aucune ligne de code n'est issue d'un programme antérieur. Il n'a pas de compte à rendre de ce côté. Il a la caractéristique d'être totalement modulaire et orienté objet. Ce qui lui confère la possibilité de faire aisément du multi-grille, du multi-domaine et par conséquent d'être parallélisé. En outre, il présente d'excellentes performances sur les machines de calcul vectoriel tel que la NEC-SX5 ou la NEC-SX8.

Voici la chronologie de l'évolution de TRIDIMO qui est devenu depuis la restructuration du code en 2006 TEMSI-FD :

- OCTOBRE 2001 : début du projet, réalisation du cahier des charges ( C. GIRAUDON - C. GUIFFAUT - A. REINEIX).
- NOVEMBRE 2001 : début du développement ( C. GIRAUDON - C. GUIFFAUT).
- Fin DÉCEMBRE 2001 :
  - Première version opérationnelle du code. Il contient notamment : un moteur de calcul FDTD optimisé en fonction des types de matériaux présents dans la structure modélisée ; prise en compte de matériaux avec ou sans pertes ; traitement des interfaces ; des fonctions sources diverses ; des conditions aux frontières de type PML, mur électrique et mur magnétique ; injecteur d'ondes planes ; structures filaires ; lecture des données du script et bibliothèque pour faciliter la lecture du fichier d'entrée ; résultats : points d'observation en champ proche (C. GIRAUDON - C. GUIFFAUT)
  - Guide d'utilisation au format texte
- FÉVRIER 2002 : structure filaire oblique, résultats sur les structures filaires (V,I,Z,Q), gestion des intervalles de stockage en temps et en fréquence (C. GIRAUDON). Toron filaire avec le modèle de Holland, resultat surfacique des champs (C. GUIFFAUT).
- MARS 2002 : toron filaire avec un modèle amélioré (C. GUIFFAUT)
- AVRIL 2002 : sources de courant et de tension, injecteur axial dans les milieux stratifiés (C. GUIFFAUT)
- MAI 2002 :

- Source de tension, un nouveau paramètre permet de définir la durée de présence de toutes les sources. On peut maintenant spécifier le format de stockage en fréquence pour les champs soit : `reelle_imaginaire`, `module_phase`, `module_db_phase`. Les mêmes possibilités sont offertes pour le stockage des surfaces de champ (C. GUIFFAUT)
- JUILLET 2002 (C. GUIFFAUT)
  - Harmonisation des structures filaires, correction de bugs, 3 types de structures filaires existent :
    - Structure filaire basée sur le formalisme de Holland
    - Structure filaire généralisée, traite des fils inclinés
    - Toron filaire : traite plusieurs fils au sein de la même cellule (fils parallèles aux axes cartésiens). Les résultats peuvent être indépendants de la position des fils dans la cellule.

Des validations supplémentaires ont été faites et dans les mêmes conditions, on obtient maintenant les mêmes résultats avec les 3 types de structures filaires.
- Une correction arithmétique est apportée sur le courant stocké : pour le stockage, celui-ci est calculé en temps et au même instant que la tension.
- SEPTEMBRE 2002 (C. GUIFFAUT)
  - Nouvelle version de TRIDIMO et mise à jour du guide (format texte) toujours à la même adresse. Des exécutables sont disponibles pour 3 types de machine et accessibles à tous les Ircomiens.
  - Les nouveautés :
    - Le code est opérationnel sur Uqbar avec des performances moyennes entre 1 GFLOPS et 4 GFLOPS. Certains algorithmes ont été modifiés pour de meilleures performances. Rappel : Utiliser UQBAR que lorsque vous avez plus de 100 cellules dans la direction Ox et plus d'un million de cellules dans le volume...
    - Le calcul du champ lointain est opérationnel (pour les spécialistes : la méthode employée est mixte temps-fréquence avec surface de Huygens dédoublée ce qui évite les interpolations).
    - Concernant l'injection d'une onde plane : la réflexion de l'onde plane sur une plaque parfaitement conductrice infinie est prise en compte grâce à un injecteur 1D qui gère uniquement la réflexion.
    - Dans le bloc `<temps_frequence>`, pour spécifier un intervalle de stockage sur toute la durée de la simulation, il suffit maintenant de mettre uniquement le mot clé "IT" avec un nom attaché : `IT_nom`
- OCTOBRE 2002 (C. GUIFFAUT)
  - Commentaires en bout de lignes autorisés dans le fichier d'entrée
  - Milieu dispersif mis en oeuvre et validé. Les modèles de Debye et de Lorentz à N pôles sont traités. Le milieu peut être dispersif électrique ou magnétique ou les deux à la fois. Aux interfaces, un moyennage des milieux dispersifs est réalisé.
- NOVEMBRE 2002 (C. GUIFFAUT)
  - Evaluation précise du temps de calcul d'une simulation avec la fonction `CPU_TIME` (mesure du temps processeur). Les temps de calcul sont donnés à la fin de la simulation pour les champs E et H, les frontières...
  - Corrections, Bug : stockage des surfaces en temps et en fréquence -> erreur corrigée due à un problème de compilation uniquement sur IBM Power 4. Correction bug : déallocation dans le module `module_zone_angulaire.f90`
- DECEMBRE 2002 (C. GUIFFAUT)
  - Sous échantillonnage temporel pour la Transformée de Fourier Discrète -> un gain de temps conséquent pour le calcul de la TFD.
  - Modification dans le bloc `<champ_lointain_frequence>`. Lorsque l'utilisateur spécifie la puissance rayonnée comme paramètre unique de stockage dans le calcul du champ lointain, il n'a plus besoin de définir une zone angulaire.
- MARS 2003 (C. GUIFFAUT)
  - Réalisation de la documentation sur TRIDIMO avec l'éditeur Lyx, première version.
- AVRIL 2003 (S. BESSE, C. GUIFFAUT)
  - Milieu fractal 3D pour faire de la granulosité (auteur S. BESSE).

- Circuit rlc avec les torons filaires.
- Stockage volumique de la permittivité et de la conductivité.
- JUIN 2003 (A. REINEIX, C. GUIFFAUT)
  - Sources dipolaires (dipoles élémentaires). Possibilité de faire rayonner des réseaux de dipoles élémentaires dans n'importe quel région de l'espace.
- AOUT 2003 (C. GUIFFAUT)
  - Mise à jour du guide de l'utilisateur de TRIDIMO (VERSION 1.5). Correction importante et ajout de la description de nouveaux modules. Documentation complète.
- Avril 2004 (C. GUIFFAUT)
  - Prise en compte de surfaces rugueuses décrites dans un fichier (bloc <structure>).
- 2004 (C. GUIFFAUT)
  - Champ lointain calculé à partir des courants circulant sur les conducteurs horizontaux et en tenant compte d'une interface air-sol (bloc <champ\_lointain\_frequence>).
  - Injecteur d'ondes planes en milieu stratifié (bloc <onde\_plane>)
  - Nouveau module pour les structures filaires avec la description des jonctions entre fils simplifiée, jonctions entre fils généralisées, jonction fil-PML, gestion des gros fils ... (Bloc <structure\_fil> et <resultat\_structure\_fil>).
  - Mise en place du formalisme des fentes minces (bloc <structure>).
  - Mise en place des plaques minces, formalisme de béranger (bloc <structure>).
  - Sur une surface de type metal, il est possible de faire un trou avec le mot clé non\_metal (bloc <structure>).
  - Nouvelles fonctions sources (ou forme d'onde temporelle) : Fonction de Heidler pour la foudre, IEMN exponentielle quotient, pulse sinus. Enfin, la fonction source peut être lue dans un fichier (bloc <fonction\_source>).
- Début 2005 (C. GUIFFAUT)
  - Modèles canal foudre avec les sources de courant et les sources dipolaires (blocs <source\_courant> et <sources\_dipolaires>).
- AOUT 2005 (C. GUIFFAUT)
  - Calcul champ électrique et magnétique en tout point de la cellule en tenant compte des interfaces diélectriques
  - Calcul du champ lointain en présence d'un milieu stratifié infini. La formulation présentant des problèmes théorique dans certains cas. Une révision ultérieure sera effectuée.
- Septembre 2005 (C. GUIFFAUT)
  - Apport à la syntaxe dans les fichiers d'entrée de TRIDIMO. Jusqu'à maintenant, seul des espaces étaient autorisés pour la séparation des données. Désormais, la tabulation est reconnue ainsi que la virgule et le point virgule. Mais, c'est pas une raison pour en abuser ! Au fait j'ai pas vérifié sur UQBAR (Sic, et bien si il y a un problème on me le dira ?).
- Octobre 2005 (C. GUIFFAUT)
  - VERSION 2 du guide TRIDIMO
  - Périodisation de structure en incidence normale (mode de Floquet)
  - Base de fréquence logarithme
  - Normalisation des réponses en fréquence
  - Nouvelle structure GRILLE\_METAL, qui modélise des grilles métalliques cartésiennes.
- Janvier 2006 (C. GUIFFAUT) - VERSION 1.0 TEMSI
  - Restructuration complète de TRIDIMO dont l'objectif est la création d'une librairie commune à tous les solveurs en cours de développement (FDTD, ADI-FDTD, Galerkin Discontinu, MTL, FVTD). Cette restructuration doit faciliter la mise en place d'une version OPEN-SOURCE sous licence LGPL. La maintenance des différents solveurs devraient être facilitée grâce à la partie commune entre eux. Les sources sont donc éclatées dans une arborescence de répertoire. Un makefile plus élaboré permet de compiler aussi bien avec le compilateur Intel (ifort) que le compilateur Lahey-Fujitsu (lf95). Les fichiers sources voient

leur nom modifié. Le préfixe `module_` est transformé en `m_` si le fichier fait parti de la librairie TEMSI, `mfdtd_` si le fichier fait partie du solveur TEMSI-FD et `mtl_` si le fichier fait partie du solveur TEMSI-TL (LAMLM).

- La restructuration conduit à la naissance d'une plateforme de simulation TEMSI (Time ElectroMagnetic SImulateur). Le nom du solveur TRIDIMO est abandonné au profit de TEMSI-FD (TEMSI- Finite Difference).
- Mars 2006 (C.GUIFFAUT)
  - Réécriture du coeur de calcul FDTD (module `m_champ.f90`) afin que les compilateurs puissent vectoriser sans problème les algorithmes de calcul des 6 composantes du champ e.m.. Merci à BULL pour leurs conseils sur l'optimisation. Un gain de 50% en temps de calcul est obtenu grâce à ces modifications avec la version 9 du compilateur intel pour les processeurs intel intégrant le jeu d'instruction SSE3 de vectorisation (P4 récent, P. M, Pentium D, XEON). Ca ne marche pas sur les processeurs AMD pour une raison que j'ignore...
- Juin 2006 (C.GUIFFAUT)
  - Enfin du circuit dans TEMSI (version recherche). Des circuits linéaires (à base de RLC) d'ordre élevé peuvent être traités au sein du formalisme des fils minces de Holland (Bloc `<structure_fil>`). Un bloc `<circuit>` permet de décrire le circuit sous une forme littérale ou à l'aide d'une série de coefficients de la fraction rationnelle de PADE. Des circuits de types dipôle et quadripôle peuvent ainsi être traités.
- Octobre 2006 (C. GUIFFAUT) - SIBC et parallélisme OPEN-MP
  - Parallélisme de TEMSI-FD avec la bibliothèque OPEN-MP (jeux d'instruction par directive de compilation transparente pour une compilation monoprocesseur). Ce parallélisme peut s'appliquer sur un noeud de processeurs ou un multi-coeurs à mémoire partagée. L'algorithme de calcul des champs et le traitement des PMLs sont les principaux bénéficiaires. Sur la NEC-SX8 de l'Idris, le gain est d'environ 7 avec 8 processeurs.
  - Mise en place d'un module pour le traitement des impédances de surface (Surface Impedance Boundary Condition), (version recherche). Trois schémas ont été développés. Le premier un schéma basé sur la transformée bilatérale en Z d'une impédance sous la forme d'une fraction de PADE avec les inconnues positionnées sur les arêtes des mailles FDTD. Le deuxième schéma est aussi basé sur la transformée bilatérale en Z avec cette fois ci les inconnues positionnées aux centres des faces. Le troisième schéma a comme point départ une décomposition en éléments simples de l'impédance. Ensuite un schéma de résolution exponentiel est appliqué. Les inconnues sont positionnées aux centres des faces.
- Novembre 2006 (C. GUIFFAUT) - BIBC
  - Traitement des impédances de surface et de transfert (version recherche). Matrice d'impédance permettant le couplage des champs de part et d'autre d'une surface conductrice. Le schéma de résolution est exponentiel et déduit de la décomposition en éléments simple de l'impédance en fréquence.
- Janvier 2007 (C. GUIFFAUT)
  - Développement d'un nouveau formalisme des fils obliques compatibles avec le formalisme des fils minces de Holland (version recherche). Il autorisent notamment les jonctions multiples entre fils et est compatible avec les fonctions développées pour le formalisme de Holland (circuit, prise en compte des pertes, fil infini ...).
- Mars 2007 (C. GUIFFAUT) - Sources dipolaires
  - Correction d'un bogue survenant lors de l'utilisation simultanée d'au moins deux réseaux de sources dipolaires.
  - Mise en oeuvre d'une nouvelle façon de décrire un réseau de sources dipolaires en positionnant une à une chaque source dans l'espace. Pour chacune de ces sources, les propriétés suivantes doivent être définies : nom de la forme d'onde (fonction source), amplitude, position, orientation, phase, retard.

## Chapitre 3

# Utilisation de TEMSI-FD

TEMSI-FD est actuellement compilé sur différentes machines :

- PC - Linux : 3 versions pour 3 compilateurs que sont lf95 (Lahey Fujitsu), ifort (intel V.9) et g95 (open-source). Pour les PCs récents doté de processeurs P4 ou de générations plus récentes, la version compilée avec ifort offre un gain de 2 par rapport à la version compilée de lf95 et ceci grâce aux instructions d'optimisation SSE3. Le responsable de TEMSI fourni à la demande les executables pour les utilisateurs de XLIM. Les noms des binaires sont les suivants :
  - temsi-fd -> compilateur lf95
  - temsi-fd\_i -> compilateur ifort
  - temsi-fd\_g95 -> compilateur g95
- Limrec (Dec-alpha), le nom du binaire est 'tridimo'. Il est accessible aux permanents et aux non-permanents d'XLIM sur la machine Limrec du SCI (Service Commun Informatique de l'Université de Limoges). Il se trouve dans le répertoire :

```
/users/ircom/tristant/BIN/tridimo
```

- Brodie, c'est le nom de la machine vectorielle de l'IDRIS (Centre de calcul du CNRS). La performance moyenne se situe autour de 5 GFLOPS. Certains algorithmes ont été modifiés pour de meilleures performances sur les machines vectorielles. Une version mono-processeur et une autre multi-processeur sont disponibles dans le répertoire suivant (pour ceux qui ont un compte à l'IDRIS) :

```
/home/rech/irc/rirc911/tridimo      --> version monoprocasseur  
/home/rech/irc/rirc911/tridimo_omp  --> version multiprocasseurs
```

La version multiprocasseurs est basée sur un parallélisme avec la bibliothèque OPEN-MP. Le parallélisme ne s'applique qu'au niveau d'un noeud de processeurs à mémoire partagée. Dès lors, il s'exécutera sur la NEC-SX8 au maximum avec 8 processeurs. Dans ce cas limite, les gains par rapport au cas monoprocasseur sont de l'ordre de 7.

**Remarque importante :** Utiliser Brodie que lorsque vous avez plus de 100 cellules dans la direction Ox et plus d'un million de cellules dans le volume. Les performances de vectorisation dépendent largement de la longueur des vecteurs suivant Ox (donc du nombre de cellules suivant Ox).



## Chapitre 4

# Syntaxe du manuel

A partir de la section 9, 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 5

# Etapes d'une modélisation

Faisons le bilan de ce que l'on devrait avoir à définir dans une modélisation.

Tout d'abord, précisons que les structures que vous allez décrire (antenne, sol, environnement, circuit, usine à gaz ...) doivent être maillées (j'utilise dans ce rapport les mots maille ou cellule pour la même signification). Je rappelle que le logiciel TRIDIMO est basé sur la méthode FDTD en coordonnées cartésiennes. Cette méthode consiste à calculer par un algorithme itératif dans le domaine temporel, les six composantes du champ électromagnétique dans chacune des mailles constituant le volume de calcul. Le volume de calcul est parallélépipédique comme les mailles qui le constituent. En outre, le maillage est uniforme. En d'autres termes, toutes les cellules ont la même taille. Ceci est contraignant pour la structure qui n'est évidemment jamais carrée. Ceci nécessite donc d'ajuster le maillage et de faire, en particulier, des approximations avec un maillage en marche d'escalier lorsqu'une structure est oblique ou incurvée. En conclusion, il n'existe pas de mailleur automatique et c'est à vous de faire le maillage de la structure à étudier.

Le système de coordonnées en nombre de cellules est très important à comprendre. Il est défini dans la section 9.1.2. la manière de décrire une cellule en nombre de cellules est présentée dans la section 10.3.

Ceci étant dit, vous comprendrez mieux que la première chose que vous ferez, c'est de réfléchir à la taille de la maille élémentaire ( $dx, dy$  et  $dz$ ). En fait, celle-ci est calculée sur la base du plus petit élément de la structure. Je reconnais que ce n'est pas évident de le deviner lorsqu'on est débutant. Aussi quelques indices sont données au paragraphe 10.3 pour vous éclairer sur le sujet (voir aussi les contraintes de la FDTD ???).

Ensuite, vous déduirez la taille du volume de calcul. Il consistera en un parallélépipède qui entoure votre structure de très près... Pour éviter la réflexion des ondes sortantes aux frontières du volume de calcul, des conditions absorbantes y sont appliquées (je ne fais que vous rappelez ce que vous avez lu sur les bases de la méthode, si ça ne vous dit rien, retournez lire les fondamentaux de la FDTD). Bien sûr, d'autres conditions aux frontières existent. Par exemples, pour faire des symétries, pour passer d'un domaine tridimensionnel à un domaine bidimensionnel voir à une dimension ou pour périodiser des structures...

La grille étant définie, vous allez y insérer des matériaux conducteurs ou diélectriques, magnétiques, à pertes, dispersifs ... Dans un premier temps, les paramètres électromagnétiques de ces matériaux sont à définir. Puis, les structures (formes surfaciques et volumiques ...) qui en sont constituées, devront être décrites et positionnées avec pour unité la cellule élémentaire. Des structures de formes filaires (conducteurs filaires) obliques ou parallèles à la grille peuvent aussi être insérées. Ces formes filaires seront de type conducteur parfait ou présentant des pertes électriques. Ces fils sont droits mais ils peuvent être connectés à d'autres fils ou à une plaque conductrice. Il faudra donc définir les jonctions entre fils ou les jonctions entre des fils et des plaques métalliques.

Enfin, des charges localisées peuvent être insérées sur les fils, ainsi que des générateurs de tension ou de courant. Pour les générateurs, il est nécessaire de définir au préalable la forme de l'excitation temporelle ( la fonction source) qui fait partie de ses propriétés.

D'autres sources indépendantes sont proposées pour exciter les structures :

- En réception, l'injecteur d'onde plane
- En émission, les sources de tension et de courant localisées et les sources dipolaires

Dans les deux cas, il est nécessaire d'avoir défini au préalable la forme de la fonction source (Impulsion gaussienne, sinus...).

Une fois caractérisés les matériaux, les structures (filaires, surfaciques ou volumiques), les charges localisées et les sources d'excitation, on a fait le tour de ce que l'on peut actuellement modéliser.

Il nous reste un gros morceau à voir : le post-traitement, c'est à dire quels sont les résultats que l'on veut obtenir ?

Actuellement, les résultats que proposent TRIDIMO sont les suivants :

- Point ou surface d'observation en champ proche (interne au volume de calcul) sur les six composantes du champ E.M., en temps et/ou fréquence
- Calcul des paramètres électriques (tension, courant impédance) par deux approches :
  - Approche générale mais « manuelle » : tension entre deux points à définir et orientés suivant Ox, Oy ou Oz. Courant à partir de la circulation du champ magnétique sur un contour à définir, calcul d'impédance par la combinaison des deux méthodes.
  - Approche propre aux fils : tension, courant, impédance, impédance d'entrée et charge
- Champ lointain à partir de la définition d'une surface de Huygens en champ proche. La surface de Huygens doit être définie au préalable ainsi que les zones angulaires de rayonnement. Les résultats donnés en champ lointain sont les composantes du champ en coordonnées sphériques ( $E_\theta, E_\phi$ ), les composantes de la directivité ( $D_\theta, D_\phi$ ) et la puissance rayonnée. Tous ces résultats sont exprimés en fonction de la fréquence et de la direction de rayonnement.

La description du script de données de la modélisation se décompose donc naturellement en cinq étapes. A chaque étape de modélisation correspond un ou plusieurs blocs de données. Ces étapes sont présentées ci-dessous avec leurs blocs de données.

## 1. PARAMETRES GLOBAUX FDTD, MAILLAGES, FRONTIERES

Les premières données de modélisation à décrire sont : la taille du volume en nombre de cellules, le maillage et les types de frontières. Deux blocs sont associés

**BLOC** : <volume\_calcul>

-> Volume de calcul, taille des mailles

**BLOC** : <frontieres>

-> Définition des frontières du volume

Le bloc <volume\_de\_calcul> est obligatoire !

## 2. MILIEUX ET STRUCTURES

Les structures surfaciques et volumiques sont décrites par des surfaces élémentaires rectangulaires et des volumes de forme parallélépipédique orthogonale. Avant de décrire les structures, il faut définir les différents matériaux mise en jeu (excepté pour les conducteurs parfaits qui ont un identifiant prédéfini).

Les blocs associés sont :

**BLOC** : <milieu\_simple>

- > Déclaration et définition de matériaux qui sont non dispersifs (caractérisés par les paramètres électromagnétiques classiques :  $\varepsilon$ ,  $\mu$ ,  $\sigma_e$  et  $\sigma_h$ )

**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)

**BLOC** : <structure>

- > Définition de la structure par des surfaces rectangulaires et des volumes parallélépipédiques. Ce bloc a besoin des noms de matériaux définis dans les blocs <milieu\_simple> ou <milieu\_dispersif>. Ce qui veut dire que l'un de ces deux blocs (ou les deux) devra être défini avant le bloc <structure>.

### 3. FONCTIONS SOURCES ET SOURCES D'EXCITATION

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 blocs associés sont :

**BLOC** : <fonction\_source>

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

**BLOC** : <onde\_plane>

- > Génération d'ondes planes dans un volume fermé par une surface de Huygens parallélépipédique avec un injecteur oblique. Un plan de masse infini peut être présent. Un injecteur axial est proposé pour faire propager les ondes en incidence normale dans un milieu stratifié.

**BLOC** : <source\_tension>

- > Alimentation locale par générateur de tension doté ou non d'une résistance interne. Le générateur est inséré sur une arête du maillage FDTD. Ses extrémités doivent être reliées à un conducteur.

**BLOC** : <source\_courant>

- > Alimentation locale par générateur de courant doté ou non d'une résistance interne (modèle de Norton). Le générateur est inséré sur une arête du maillage FDTD.

Le bloc <fonction\_source> est utilisé par les autres blocs d'excitation ci-dessus et doit donc être défini avant.

Attention, le nom de bloc <generateur> est obsolète et remplacé par le nom de bloc <fonction\_source> qui est plus explicite.

Le bloc <fonction\_source> est utilisé par les autres blocs d'excitation ci-dessus et doit donc être défini avant.

Attention, le nom de bloc <generateur> est obsolète et remplacé par le nom de bloc <fonction\_source> qui est plus explicite.

### 4. STRUCTURES FILAIRES et COMPOSANTS SUB-CELLULAIRES

Les structures filaires doivent être défini après le bloc <fonction\_source> de la 3<sup>me</sup> étape car des générateurs peuvent être insérés sur les fils. Ce qui explique pourquoi ils doivent être définis seulement à la 4<sup>me</sup> étape. Les fils sont des structures dont le rayon doit être obligatoirement inférieur à la plus petite taille transverse de la maille. Des composants sub-cellulaires simples (charge R, L, C) peuvent être pris en compte.

**BLOC** : <structure\_fil>

- > Utilise le formalisme de Holland. Les fils sont obligatoirement placés sur les arêtes de cellules (direction x,y ou z). Le rayon du fil doit être inférieur à la taille transverse de cellule la plus petite divisée par 5. Des circuits de type RLC série peuvent être insérés ainsi que des générateurs de tension ou de courant. Les jonctions entre fils, entre fil et conducteur surfacique et entre fils et les absorbants PML sont gérées.

## 5. 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** : <resultat\_champ\_point>

- > Point d'observation en champ proche (interne au volume de calcul). Les composantes de champ indiquées sont stockées aux points d'observation spécifiés.

**BLOC** : <resultat\_champ\_surface>

- > Surface d'observation en champ proche (interne au volume de calcul). Les composantes de champ indiquées sont stockées sur les surfaces d'observation spécifiées. Ces surfaces sont de forme rectangulaire et plan xoy, yoz ou xoz.

**BLOC** : <resultat\_champ\_volume>

- > non mis en oeuvre.

**BLOC** : <resultat\_v\_i\_z>

- > Tension entre deux points à définir et orientés suivant Ox,Oy ou Oz. Courant à partir de la circulation du champ magnétique sur un contour à définir, calcul d'impédance par la combinaison des deux méthodes.

**BLOC** : <resultat\_impedance>

- > non mis en oeuvre

**BLOC** : <resultat\_structure\_fil>

- > Paramètres retenus : tension, courant, impédance, impédance d'entrée, charge.

**BLOC** : <surface\_huygens>

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

**BLOC** : <zone\_angulaire>

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

**BLOC** : <champ\_lointain\_frequence>

- > Calcul du champ lointain, de la directivité et de la puissance rayonnée en fonction de la fréquence et des zones angulaires précédemment définies.

**Le fichier de données peut se terminer par un mot clé spécial : <fin\_fichier>. Tout ce qui se trouve après ce mot clé est ignoré par TRIDIMO.**

## Chapitre 6

# Occupation mémoire et temps de calcul

### 6.1 Mémoire

La résolution par la méthode des différences finies nécessite de mémoriser au minimum les inconnues de chaque cellule élémentaire du volume de calcul. Ensuite, cette méthode offre la possibilité de traiter des volumes avec d'importantes inhomogénéités de matériau. Les caractéristiques de chacun de ces matériaux sont prises en compte dans les coefficients multiplicatifs des champs des équations solutions de Maxwell par la méthode FDTD. Dans les algorithmes développés de TEMSI-FD, dès que deux matériaux au moins sont présents dans le volume de calcul, les coefficients multiplicatifs des champs sont mémorisés dans des tableaux 3D afin de gérer avec un maximum de souplesse les caractéristiques du milieu de chaque cellule. Ainsi chaque cellule peut contenir un matériau différents des autres puisque les tableaux 3D sont dimensionnés au nombre total de cellules. En fonction du type d'inhomogénéité, les algorithmes de calcul et le nombre de tableaux 3D changent.

L'occupation mémoire d'une simulation est principalement liée au nombre d'inconnues et donc au nombre total de cellules ainsi qu'aux matériaux présents. Les autres formalismes occupent une place mémoire négligeable (onde plane, fil mince, sorties, champ lointain...). Il peut toutefois y avoir des exceptions comme dans le cas des sources dipolaires où l'utilisation d'une grande surface de Huygens et d'un nombre de dipôles importants seraient requis (cf. §??).

Les conditions aux frontières de type PML rajoutent un encombrement mémoire non négligeable dont nous tenons compte systématiquement dans les formules ci-dessous. Voici les relations permettant de calculer l'occupation mémoire en fonction des types de matériaux présents. On supposera que les calculs sont réalisés en simple précision soit une taille de 4 octets par valeur réelle. On supposera que les PMLs peuvent entourées le volume de calcul avec un nombre de couches désigné par  $N_{pml}$ . Les nombres de cellules dans chacune des trois directions cartésiennes sont  $N_x$ ,  $N_y$  et  $N_z$  (les PMLs sont exclues).

Soit  $N_{cell}$ , le nombre total de cellules (incluses les cellules des PMLs) défini par :

$$N_{cell} = (N_x + 2 + 2N_{pml}) \times (N_y + 2 + 2N_{pml}) \times (N_z + 2 + 2N_{pml})$$

Si aucun matériau volumique n'est présent (diélectrique avec ou sans pertes, matériaux magnétiques...) mais la présence de structure surfacique de type métal (conducteur parfait) ou de type fil mince est admise, la taille mémoire est :

$$M_0 = N_{cell} \times 6inconnues \times 4octets$$

Si des matériaux diélectriques sans pertes sont présents, 3 tableaux 3D sont alloués (un par composante de champ électrique) soit  $N_{el} = 3$

Si des matériaux diélectriques avec pertes sont présents, 6 tableaux 3D sont alloués (deux par composante de champ électrique) soit  $N_{el} = 6$

Si des matériaux magnétiques sans pertes sont présents, 3 tableaux 3D sont alloués (un par composante de champ magnétique) soit  $N_{ma} = 3$

Si des matériaux diélectriques avec pertes sont présents, 6 tableaux 3D sont alloués (deux par composante de champ magnétique) soit  $N_{ma} = 6$

La taille mémoire globale en octet sera de :

$$M_{tot} = N_{cell} \times (6inconnues + N_{el} + N_{ma}) \times 4octets$$

## Chapitre 7

# Les constantes scientifiques

Les constantes scientifiques suivantes sont communes à tous les modules sources de TEMSI-FD :

$\varepsilon_0$	=	EPSILON_0	=	8.854187818e-12
$\mu_0$	=	MU_0	=	12.5663706144e-7
$\pi$	=	PI	=	3.141592654
$c$	=	CVIDE	=	299792458.0
$\eta_0$	=	ZVIDE	=	376.7303135



# Chapitre 8

## Exemples de base

Voici quelques exemples de fichiers d'entrée. Lisez ces exemples et référez-vous aux paragraphes suivants pour avoir la signification des mots clés qui vous échappent.

### 8.1 Propagation 1D

Il s'agit de la propagation d'une onde monodimensionnelle dans un milieu air-eau. La modélisation permet le calcul du coefficient de réflexion en incidence normale à l'interface air-eau. La propagation se fait dans la direction Ox (position de l'interface  $510\Delta x$ ). Pour avoir le champ incident de référence, retirer la structure eau.

```
<volume_de_calcul
  nxnynz      1010 1  1
  dxdydz      0.05e-3 0.05e-3 0.05e-3 # en mètres
  duree_totale 9.14e-11
volume_de_calcul>
<frontieres
  # par défaut, des couches PML sont appliquées sur chaque face externe.
  mur_electrique xoyinf xoysup
  mur_magnetique xoyinf xozsup
frontieres>
<fonction_source
gaussienne    gauss
  fmax      80e9      # la fréquence maximale
  att_fmax 10         # atténuation à la fréquence fmax
  att_pied  1000      # atténuation à t=0 de la gaussienne
                        # par rapport à l'amplitude max.
fonction_source>
<onde_plane
  # Propagation de l'onde entre 500 et 600 $\Delta x$ 
  dim_huygens 500 600  1 2 1 2
  surface    yozinf
  injecteur  gauss      90    0 0 1    25
```

```

onde_plane>
<milieu_dispersif
    milieu eau
    epsrd debye 1.8 81 9.4e-12 1.0
milieu_dispersif>
<structure
    eau 510 1011 0 2 0 2
structure>
<temps_frequence
    IF1 0 80e9 0.5e9 #bande de fréquence
    IT1 0 1 0 #intervalle en temps
temps_frequence>
<resultat_champ_point
    pteh_0 IF1 IT1 ez 500 1 1 # champ à l'interface
    pteh_10 IF1 IT1 ez 510 1 1 # champ transmis
    pteh_ref IF1 IT1 ez 450 1 1 #uniquement la réflexion
resultat_champ_point>
<fichier_sortie
    extension dt1
fichier_sortie>
<fin_fichier>

```

## 8.2 Onde plane, espace 2D

Une onde plane est injectée en incidence oblique sur un plan de masse infini. L'injecteur d'ondes planes gère la réflexion sur le plan de masse. Trois points d'observation sont placés ainsi qu'une surface d'observation.

```

<volume_de_calcul
    nxnynz 100 100 1
    dxdydz 2 2 2 # en mètres
    duree_totale 1.4e-6
volume_de_calcul>
<frontieres
    mur_electrique xoyinf xoysup
frontieres>
<fonction_source
    gaussienne gauss
    fmax 10e6
fonction_source>
<onde_plane
    surface xoyinf xoysup yozinf xozinf xozsup
    dim_huygens 5 95 5 95 1 2
    mur_electrique yozsup
    injecteur gauss 90 45 0 1

```

```

onde_plane>
<structure
    metal 95 95 1 101 1 2
structure>
<temps_frequence
    IF1 0 10e6 100e3
    LF1 5e6
    IT1 # intervalle complet en temps
    LT1 0.3e-6 0.4e-6 0.5e-6 0.6e-6 0.7e-6 0.9e-6 1.1e-6 1.3e-6
temps_frequence>
<fichier_sortie
    extension dt2
fichier_sortie>
<resultat_champ_point
    ptez1 IT1 ez 30 30 1
    ptez2 IT1 ez 3 3 1
    ptez3 IT1 ez 97 97 3
resultat_champ_point>
<resultat_champ_surface
    module_phase
    surfxy LT1 LF1 ex ey ez 1 101 1 101 1 1 1 1 1
resultat_champ_surface>

```

## 8.3 Monopole

L'impédance et le courant d'entrée ainsi que le champ lointain sont calculés sur un monopole orienté suivant Ox de longueur 15 mètres.

```

<volume_de_calcul
    nxnynz 40 10 10
    dxdydz 0.5 2 2
    duree_total 3e-6
volume_de_calcul>
<frontieres
    profil_pml_geometrique 10 1e-3 2.2
    mur_electrique yozinf
frontieres>
<fonction_source
    gaussienne gauss
    fmax 20e6 # la fréquence maximale
fonction_source>
<structure_fil
    F1 1 31 6 6 6 6 2e-3 # le monopole

```

```

        GV1    F1  1  gauss 1.0 50 # générateur de tension
        JFP1  deb  F1  # jonction fil-plaque

structure_fil>
<temps_frequence
    IF1 0 20e6  50e3
    IT1
    LF1 4.7e6 4.8e6 4.9e6
    LF2  9.5e6 9.6e6 9.7e6

temps_frequence>
<resultat_structure_fil
    # le courant au niveau de générateur
    I1 IT1 IF1  F1 1
    # Impédance d'entrée sur le générateur GV1
    ZE1  IF1  F1 GV1

resultat_structure_fil>
<zone_angulaire
    ITH1 -180 180  2  0.0  # plan E
    ITH2 0.0 360.0  2  90.0 # plan H

zone_angulaire>
<surface_huygens
    SURF1  xsup yinf ysup  zinf zsup 1 35 5 7 5 7

surface_huygens>
<champ_lointain_frequence
    module_db_phase
    CHL1  SURF1 LF1
        DTH DPH PR  ITH1
        DTH DPH      ITH2
        image yoz 1
    CHL2  SURF1 LF2
        DTH DPH PR  ITH1
        DTH DPH      ITH2
        image yoz 1

champ_lointain_frequence>
<fin_fichier>

```

## Chapitre 9

# Volume de calcul - Frontière - Surface de Huygens

### 9.1 Volume de calcul, <volume\_calcul>

#### 9.1.1 Rôle et syntaxe

Le bloc <volume\_calcul> est obligatoire. Il décrit les paramètres de maillage et de volume propre à la FDTD, ainsi que quelques autres paramètres généraux.

**Syntaxe et signification** (identifiants de base)

**nxnynz** \$I\_{n\_x}\$ \$I\_{n\_y}\$ \$I\_{n\_z}\$ # en nombre de cellules

-> Le nombre de cellules utiles (hors frontière, les cellules des frontières absorbantes sont non comprises). Les valeurs seront comprises entre 1 et quelques centaines de cellules, voir quelques milliers pour un problème 2D ou 1D (c'est la taille mémoire qui limite...).

Valeur par défaut :  $n_x = n_y = n_z = 10$ .

**dxdydz** \$R\_{\Delta x}\$ \$R\_{\Delta y}\$ \$R\_{\Delta z}\$ # en mètres

-> Les trois pas spatiaux de la maille élémentaire (en mètre).

Valeur par défaut :  $\Delta x = \Delta y = \Delta z = 1,0$ .

**duree\_totale** \$R\_{duree\\_totale}\$ # en seconde

-> La duree totale de la simulation (en seconde)

**Syntaxe et signification** (identifiants particuliers)

**cdtmax** \$R\_{cdt\_{max}}

-> Le pas temporel est déduit d'un critère de stabilité (9.1). Ce critère donne le pas temporel maximal. Le pas temporel choisi est alors :

$$dt = cdt_{max} \bullet dt_{max}$$

Le coefficient cdtmax est compris entre 0,0 et 1,0, mais de préférence le plus proche possible de 1,0. Par défaut,  $cdt_{max} = 0,97$ . Dans certains cas particuliers, il peut être nécessaire de réduire cette valeur pour assurer la stabilité.

**epsilon\_r** \$R\_{\varepsilon\_r}\$

-> Impose à tout le volume de calcul une permittivité relative par défaut.

Valeur par défaut :  $\varepsilon_r = 1, 0$ .

**mu\_r** \$R\_{\mu\_r}\$

-> Impose à tout le volume de calcul une perméabilité relative par défaut.

Valeur par défaut :  $\mu_r = 1, 0$ .

**sigma\_e** \$R\_{\sigma\_e}\$

-> Impose à tout le volume de calcul une conductivité électrique par défaut.

Valeur par défaut :  $\sigma_e = 0, 0$ .

**sigma\_h** \$R\_{\sigma\_h}\$

-> Impose à tout le volume de calcul une conductivité magnétique par défaut.

Valeur par défaut :  $\sigma_h = 0, 0$ .

**Syntaxe et signification** (identifiants pour les spécialistes)

**non\_moyennage\_permittivite**

-> Interdit le moyennage des permittivités aux interfaces entre les milieux.

**non\_moyennage\_permeabilite**

-> Interdit le moyennage des perméabilités aux interfaces entre les milieux.

**non\_moyennage\_conductivite\_electrique**

-> Interdit le moyennage des conductivités électriques aux interfaces entre les milieux.

**non\_moyennage\_conductivite\_magnetique**

-> Interdit le moyennage des conductivités magnétiques aux interfaces entre les milieux.

**Conseils :**

- Prenez l’habitude de mettre le nombre de cellules le plus important dans la direction (Ox). Ceci est fortement recommandé pour les calculs sur une machine vectorielle.

**Blocs requis :** aucun

**Ordre - Règle d’apparition**

Pas d’ordre pour les identifiants. Chacun d’entre eux ne peut être défini qu’une seule fois. Si un identifiant apparaît plusieurs fois alors ce sont les données du dernier identifiant défini qui seront retenues.

**Exemple classique :**

```
<volume_calcul
  nxnynz      100   100   50   # volume utile : 100×100×50m³
  dxdydz      1.0   1.0   1.0   # pas spatiaux, cellule cubique (mètre)
  duree_totale 2e-6      # duree totale de la simulation (seconde)
volume_calcul>
```

**Exemple 2 :** remplissage par défaut du milieu par un volume

```
<volume_calcul
  nxnynz      200   200   100   # volume utile : 160×160×30m³
  dxdydz      0.8   0.8   0.3   # pas spatiaux, cellule non cubique (mètre)
  duree_totale 5e-6      # duree totale de la simulation = 5µs
  epsilon_r    2.0 # volume rempli d’un matériau avec  $\varepsilon_r = 2.0$ 
volume_calcul>
```

**Exemple 3** : cas d'un espace 2D

Lorsque le volume est réduit à un espace 2D, par exemple plan xoy, le nombre de cellules suivant Oz peut être fixé à 1. En outre, on pourra fixer le pas spatial  $\Delta z$  très supérieur aux deux autres ( $\Delta z$  n'intervient pas dans la propagation du champ). Ceci permet d'avoir un pas temporel plus élevé et de gagner ainsi en temps de calcul tout en minimisant la dispersion numérique.

```
<volume_calcul
  nxnynz    500    500    1    # espace utile : 250×250m2
  dxdydz    0.5    0.5    5.0
  duree_totale    5e-6
volume_calcul>
```

**Exemple 4** : cas d'une règle 1D

Lorsque le volume est réduit à une propagation 1D, par exemple suivant la direction Ox, les nombres de cellules suivant Oy et Oz peuvent être fixés à 1. En outre, on pourra fixer les pas spatiaux  $\Delta y$  et  $\Delta z$  très supérieurs à  $\Delta x$ . Ceci permet d'avoir un pas temporel plus élevé et de gagner ainsi en temps de calcul tout en minimisant la dispersion numérique.

```
<volume_calcul
  nxnynz    2000    1    1    # longueur de 2m
  dxdydz    1e-3    1e-2    1e-2    # $\Delta x = 1mm$ 
  duree_totale    5e-9    # 5ns
volume_calcul>
```

**9.1.2 Informations complémentaires**

Quelques rappels sont donnés ici. Pour plus de détails, voir la documentation sur la méthode FDTD.

Tout d'abord, la cellule élémentaire s'appelle aussi la cellule de Yee. Les six composantes du champ sont réparties dans la cellule comme indiquée sur la figure 9.1. On retiendra que les six composantes sont décalées entre elles d'une demi-maille. On notera aussi que les composantes de  $\vec{E}$  sont calculées à des instants  $t = n\Delta t$  alors que celles de  $\vec{H}$  sont calculées à des instants  $(n + \frac{1}{2})\Delta t$ .

L'origine du volume de calcul en nombre de cellules est (1,1,1), en mètre : (0,0,0). Pour un volume de  $n_x \cdot n_y \cdot n_z$ , le volume s'étend de (1,1,1) à  $(n_x + 1, n_y + 1, n_z + 1)$  (voir la figure 9.2). Pour la suite, lorsque l'on parle de coordonnées (par exemple i,j,k ou imin, imax...), celles ci correspondent à des positions aux noeuds des cellules. Par exemple, l'origine (1,1,1) est positionnée exactement **au noeud** de la cellule (1,1,1). En général, le volume de calcul est entouré par des PML comme présenté sur la figure 9.2. Ce sont des conditions aux frontières qui absorbent toutes les ondes sortantes. Pour plus d'informations sur les frontières, voir le paragraphe 9.2. Le positionnement des faces frontières au volume utile est invariable quel que soit le type de frontière

- xoyinf ou zinf :  $z = 1$
- xoy-sup ou zsup :  $z = N_z + 1$
- yozinf ou xinf :  $x = 1$
- yoz-sup ou xsup :  $x = N_x + 1$
- xozinf ou xozinf ou yinf :  $y = 1$
- xoz-sup ou xoz-sup ou ysup :  $y = N_y + 1$

Si la frontière est de type PML, elle aura alors une certaine épaisseur en nombre de cellule que l'on appellera *nbcouche*. Si on suppose que les frontières  $x_{inf}$  et  $x_{sup}$  sont de type PML. Dans ce cas le volume de calcul est automatiquement étendu de  $i_d = 1 - nbcouche$  à  $i_f = N_x + 1 + nbcouche$ . Ainsi, les coordonnées des structures ne changent pas quel que soit le type de frontières.

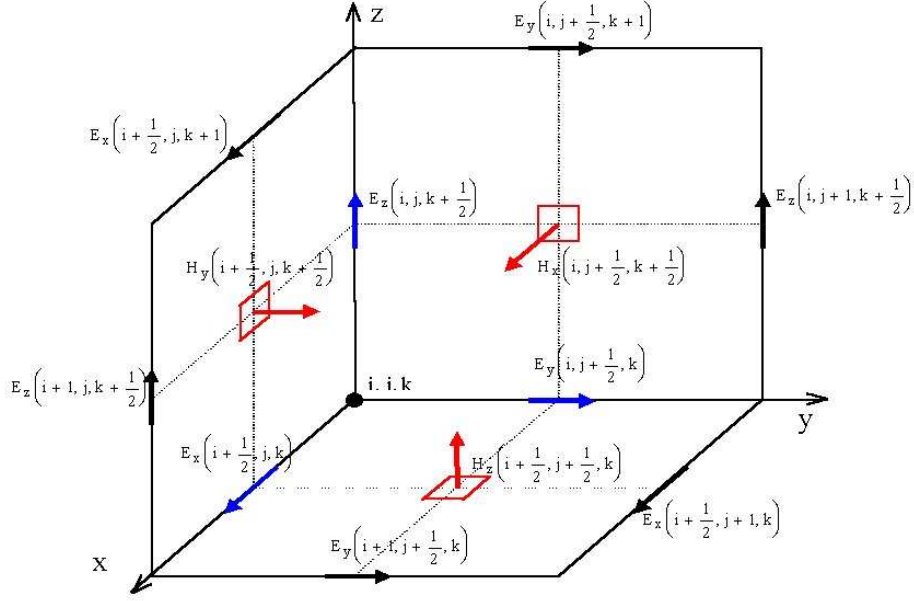


FIG. 9.1 – Schéma de Yee de la cellule élémentaire

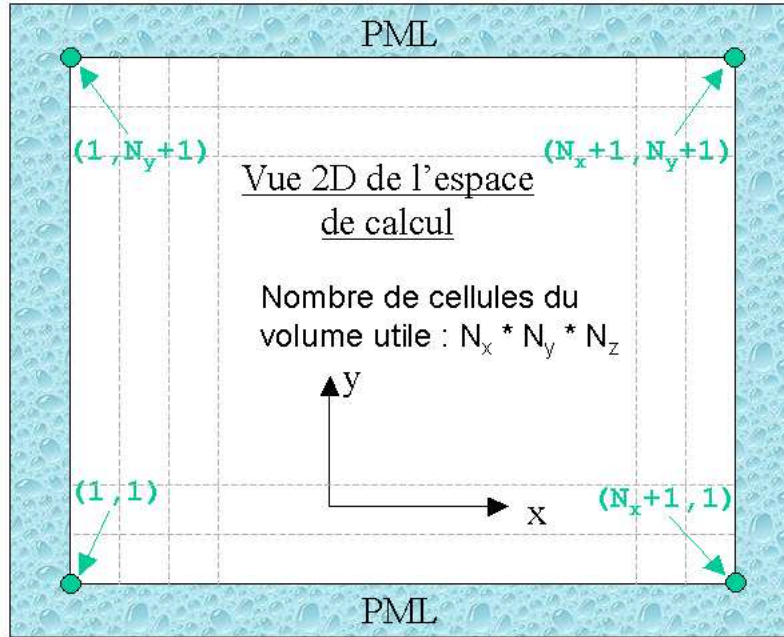


FIG. 9.2 – Volume de calcul

L'algorithme itératif FDTD est soumis à un critère de stabilité limitant la valeur du pas temporel en fonction des pas spatiaux :  $\theta$

$$\Delta t \leq \Delta t_{max} = \frac{1}{c\sqrt{1/\Delta x^2 + 1/\Delta y^2 + 1/\Delta z^2}} \quad (9.1)$$

$$c \cong 300\,000 \text{ m.s}^{-1} : \text{célérité}$$

Ce critère de stabilité reste suffisant pour tous les types de milieu (diélectrique, magnétique, dispersif, pertes électriques) car, dans ces milieux, la vitesse de phase est inférieure à la célérité. Plus généralement, la vitesse de phase la plus grande, se propageant dans l'un des milieux traités, pourrait être celle retenue pour le calcul du critère de stabilité, à la place de la célérité. On notera que si les pas spatiaux sont égaux, le critère de stabilité se simplifie :

$$\Delta t \leq \frac{1}{c} \frac{\Delta_{3D}}{\sqrt{3}}$$

En général, le pas temporel est choisi très proche du pas temporel maximal afin d'éviter un allongement inutile du temps de calcul. Par exemple, dans nos simulations, le pas temporel est fixé la plupart du temps à :

$$\Delta t = 0,97 \Delta t_{max}$$

## 9.2 Frontière, <frontieres>

### 9.2.1 Rôle et syntaxe

L'algorithme FDTD ne peut pas être appliqué sur les frontières du volume de calcul. Dès lors, des conditions aux frontières sont appliquées sur chacune des six faces. Par défaut, les frontières sont des PMLs (couches absorbantes adaptées). Elles absorbent les ondes sortantes quelles que soient la fréquence, la polarisation et la direction de l'onde. D'autres conditions aux frontières peuvent être appliquées : mur électrique, mur magnétique et sans frontière. Les mots clés décrivant les faces sont explicites. Chaque face peut être désignée par deux mots clés, soit : xoyinf ou zinf, xoysup ou zsup, yozinf ou xinf, yozsup ou xsup, xozinf ou xozinf ou zinf, xozsup ou zsup ou xozsup, Ces faces sont positionnées aux points extrêmes suivantes dans le volume de calcul (repère selon la figure 9.2, coordonnées aux noeuds des cellules) :

- xoyinf ou zinf :  $z = 1$
- xoysup ou zsup :  $z = Nz+1$
- yozinf ou xinf :  $x = 1$
- yozsup ou xsup :  $x = Nx + 1$
- xozinf ou ou xozinf ou yinf :  $y = 1$
- xozsup ou ou xozsup ou ysup :  $y = Ny+1$

**Syntaxe et signification** (identifiants de base)

**pml** [xoyinf] [xoysup] [yozinf] [yozsup] [xozinf] [xozsup]

**pml** [zinf] [zsup] [xinf] [xsup] [yinf] [ysup] # idem à ci-dessus

-> Applications des PMLs sur certaines faces, six types de face possibles.

Par défaut, les six faces sont de type pml et donc il n'est pas nécessaire d'insérer l'identifiant pml.

**mur\_electrique** [xoyinf] [xoysup] [yozinf] [yozsup] [xozinf] [xozsup]

**mur\_electrique** [zinf] [zsup] [xinf] [xsup] [yinf] [ysup] # idem à ci-dessus

-> Application d'un mur électrique (équivalent à  $\overrightarrow{E_{tangent}} = 0$ ) sur l'une ou plusieurs des six faces possibles. Le mur électrique peut servir par exemples de plan de masse ou pour créer une cavité parfaitement conductrice, pour passer à un problème bi- ou mono-dimensionnel, périodiser des structures sous incidence normale.

**mur\_magnetique** [xoyinf] [xoysup] [yozinf] [yozsup] [xozinf] [xozsup]

**mur\_magnetique** [zinf] [zsup] [xinf] [xsup] [yinf] [ysup] # idem à ci-dessus

-> Application d'un mur magnétique (équivalent à  $\overrightarrow{H_{tangent}} = 0$ ) sur l'une ou plusieurs des six faces possibles. Le mur magnétique est positionné au même endroit que le mur électrique. Il peut servir par exemples pour passer à un problème bi- ou mono-dimensionnel, périodiser des structures sous incidence normale.

**floquet\_incidence\_normale** [xoyinf] [xoysup] [yozinf] [yozsup] [xozinf] [xozsup]

**floquet\_incidence\_normale** [zinf] [zsup] [xinf] [xsup] [yinf] [ysup] # idem à ci-dessus

-> Périodisation de structures à partir des modes de Floquet. Ca ne marche qu'en incidence normale.

Les conditions suivantes sont appliquées (les coordonnées sont comme définies au paragraphe 9.1.2) :

Si condition appliquée sur **xinf** alors :  $H_y(0, :, :) = H_y(Nx_{cell}, :, :)$  et  $H_z(0, :, :) = H_z(Nx_{cell}, :, :)$ .

Si condition appliquée sur **xsup** alors :  $H_y(Nx_{cell} + 1, :, :) = H_y(1, :, :)$  et  $H_z(Nx_{cell} + 1, :, :) = H_z(1, :, :)$ .

**Syntaxe et signification** (identifiants particuliers)

**sans\_frontiere** [xoyinf] [xoysup] [yozinf] [yozsup] [xozinf] [xozsup]

**sans\_frontiere** [zinf] [zsup] [xinf] [xsup] [yinf] [ysup] # idem à ci-dessus

-> L'identifiant sans frontière sert au raccordement entre des domaines différents où la condition d'interface reste à définir.

**Syntaxe et signification** (identifiants pour les spécialistes)

**profil\_pml\_geometrique** \$I\_nb\_couche \$R\_coeff\_réflexion \$R\_coeff\_géométrique

-> Les PMLs sont composées de couches absorbantes, chacune contenant une valeur de conductivité propre et croissante dans le sens de la profondeur, suivant un profil géométrique.

nb\_couche est le nombre de couches (ou cellules dans le sens de la profondeur, par défaut, nb\_couche = 10).

coeff\_réflexion est la valeur du coefficient de réflexion attendu à l'interface air - PML (par défaut coeff\_réflexion = 1e-3 (-60dB)) .

coeff\_géométrique va définir la forme du profil géométrique (par défaut = 2.2)

**profil\_pml** \$R\_Coeff\_réflexion \$R\_Coeff\_géométrique

-> Le profil de conductivité est calculé automatiquement mais le coefficient de réflexion attendu et le coefficient géométrique doivent être indiqués. On évitera de faire appel à cet identifiant car cette approche a tendance à surestimer le nombre de couche.

coeff\_réflexion est la valeur du coefficient de réflexion attendu à l'interface air - PML (par défaut coeff\_réflexion = 1e-3 (-60dB)) .

coef\_géométrique va définir la forme du profil géométrique (par défaut = 2.5)

**Conseils :**

- Pour un problème bidimensionnel, choisir le plan xOy.
- Pour un problème monodimensionnel, choisir la direction Ox.

**Blocs requis :** aucun

**Ordre - Règle d'apparition**

Pas d'ordre pour les identifiants. Les identifiants de base peuvent apparaître plusieurs fois. Néanmoins, chaque identifiant devrait apparaître une seule fois car tous les plans sur lesquels les identifiants de base s'appliquent peuvent être définis sur la même ligne.

**Exemple classique :** PML sur toutes les faces, modification du profil de conductivité

Pour des structures faiblement résonnantes et sur lesquelles on s'intéresse à l'impédance d'entrée ou à l'adaptation, le nombre de couches PML est réduit alors que le coefficient géométrique est augmenté.

```
<frontieres
  profil_pml_geometrique 8 1e-3 3.0 # 8 couches
frontieres>
```

**Exemple 2 :** Présence d'un plan de masse infini plan xoy

```
<frontieres
  profil_pml_geometrique 10 1e-3 2.2 # 10 couches
  mur_electrique xoyinf
frontieres>
```

**Exemple 3 : Passage en 2D, plan xoy, mode TM**

Les composantes de champ non nulles sont  $E_z$ ,  $H_x$  et  $H_y$ . Pour passer d'un problème 3D à un problème 2D, il suffit, en mode TM, de disposer des murs électriques plan xoyinf et plan xoysup pour assurer la continuité de la composante  $E_z$ .

```
<frontieres
  profil_pml_geometrique  10 1e-3  2.2
  # pml yozinf yozsup
  mur_electrique  xoyinf xoysup
frontieres>
```

**Exemple 3 : Passage en 1D, Direction Ox**

Les composantes de champ non nulles sont  $E_z$  et  $H_y$ . Pour passer d'un problème 3D à un problème 1D, il suffit de disposer des murs électriques plan xoyinf et plan xoysup et des murs magnétiques xozinf et xozsup.

```
<frontieres
  profil_pml_geometrique  10 1e-3  2.2
  # pml yozinf yozsup
  mur_electrique  xoyinf xoysup
  mur_magnetique  xozsup xozsup
frontieres>
```

**9.2.2 Informations complémentaires****Mur électrique**

Les murs électriques sont des plans parfaitement conducteurs. On peut aussi les désigner selon les applications comme des réflecteurs parfaits ou plans de masse parfaits. Leur surface est infinie. C'est à dire qu'elle couvre tout le volume de calcul. Par exemple, pour une surface plan xoyinf, elle s'étend de 1 à  $N_x+1$  suivant x et de 1 à  $N_y+1$  suivant y. Si des PML se trouvent sur les faces externes normales au plan xoy, alors le mur électrique traverse toutes les couches PML.

Dans la méthode FDTD, les murs électriques sont définies en imposant simplement sur la surface que  $\vec{E}_{tangente} = \vec{0}$ . Pour une surface plan xoy, on aura sur celle-ci  $E_x = E_y = 0$ . Il s'en suit que la composante normale de  $\vec{H}$  à la surface est nulle.

**Mur magnétique**

Les murs magnétiques sont des plans parfaitement conducteurs au sens magnétique. Le mur magnétique est le dual du mur électrique. Dans la méthode FDTD, leur surface est positionnée comme pour les murs électriques avec en outre la même étendue. Ils sont définies en imposant sur la surface la condition  $\vec{H}_{tangente} = \vec{0}$ . Cependant, contrairement au mur électrique, cette condition est réalisée de manière indirecte afin que la position du mur magnétique soit au noeud de la cellule et non décalée donc d'une demie cellule. Par exemple, pour une surface plan xoyinf, on impose :

$$H_x \left( :, :, 1 - \frac{1}{2} \right) = -H_x \left( :, :, 1 + \frac{1}{2} \right)$$

$$H_y \left( :, :, 1 - \frac{1}{2} \right) = -H_y \left( :, :, 1 + \frac{1}{2} \right)$$

### Floquet incidence normale

Les conditions de Floquet sont très simples à mettre en oeuvre dans le cas de l'illumination en incidence normale (pour l'incidence oblique, le traitement en temporel est beaucoup plus complexe et lourd à développer). Il s'agit simplement de faire une copie des champs magnétiques tangentiels entre la frontière inférieure et supérieure du même plan. Par exemple avec les frontières plan xozinf et xozsup, le volume utile étant encadré par les faces de coordonnées 1 et (Ny+1) tel qu'indiqué sur la figure 9.3, les composantes magnétiques tangentielles Hx et Hz positionnées à une demi-maille en dehors des frontières xoz sont mise à jour à chaque itération temporelle comme suit :

$$\begin{aligned} H_x(:, N_y + 3/2, :) &= H_x(:, 3/2, :) , & H_z(:, N_y + 3/2, :) &= H_z(:, 3/2, :) \\ H_x(:, 1/2, :) &= H_x(:, N_y + 1/2, :) , & H_z(:, 1/2, :) &= H_z(:, N_y + 1/2, :) \end{aligned}$$

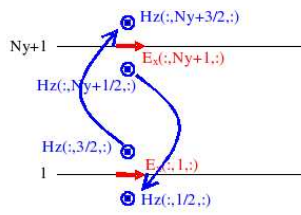


FIG. 9.3 – Conditions de Floquet pour l'incidence normale

### Sans frontière

Ce type de frontière est proposé afin de gérer les interfaces entre plusieurs volumes de calcul. Ceci concerne à priori uniquement ceux qui font des développements dans le multi-domaine, le parallélisme, l'hybridation de méthodes ou le sous-maillage... Les composantes du champ électrique tangentielle à la surface « sans frontière » ainsi que la composante normale du champ magnétique sont à définir par le développeur.

### PML

Les PML sont constituées d'un certain nombre de couches (en général entre 6 et 14), qui permettent l'absorption des ondes sortantes du volume de calcul quels que soient la fréquence, l'angle d'incidence et la polarisation. Ces couches se rajoutent à l'extérieur du volume de calcul. Par exemple, pour une PML plan xoyinf et 10 couches la constituant, ces couches seront positionnées de -9 à 1 suivant x. Si le plan est xoysup, les couches seront positionnées de Nx+1 à Nx+11.

### 9.3 Surface de Huygens, <surface \_huygens>

VOIR LE GUIDE TEMSI

**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>
```

## Chapitre 10

# Milieux - Structures

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>`.

### 10.1 Milieux simples et milieu\_fractal `<milieu_simple>`

Rôle, syntaxe et théorie -> VOIR LE GUIDE TEMSI

#### 10.1.1 Exemples

**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
  volsigex 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 1.25
    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

mantissee_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>

```

### 10.1.2 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  $\delta_p$  est en général défini pour une fréquence  $f_0$ . On peut alors déduire la conductivité électrique correspondante  $\sigma_e$ .

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.

## 10.2 Milieux dispersifs, <milieu\_dispersif>

Rôle, syntaxe et théorie -> VOIR LE GUIDE TEMSI

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 ???. On retiendra que les modèles traités peuvent contenir plusieurs pôles d'ordre 1 ou 2.

### 10.2.1 Exemples

**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 [6] :

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

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

Si on défini 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 :

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

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

```

<milieu_dispersif
    milieu plasma_drude
        sige 14.376
        epsrd debye 1.0 -80.295 50e-12 1.0
milieu_dispersif>

```

## 10.3 Structures, <structure>

### 10.3.1 Rôle et syntaxe

La géométrie de la structure à l'étude est décrite dans ce bloc. La structure est définie ici à partir de parallélépipèdes élémentaires ou de surfaces rectangulaires. A chaque structure est associée un milieu qui est identifié par un nom. Ce nom est donné par l'utilisateur dans la ligne de déclaration des blocs <milieu\_simple> et <milieu\_dispersif> (cf.§10.1 et 10.2). C'est pourquoi ces deux blocs, s'ils sont présents, doivent être définis avant le bloc <structure>.

Le système de coordonnées est en nombre de cellule. Il est important de souligner que **la première cellule du volume utile a pour coordonnées (1,1,1)**. Toutes les coordonnées positionnant et dimensionnant les structures se rapportent au noeud de la cellule de Yee et non pas au centre de celle-ci (cf. §9.1). Par exemple une structure allant de la cellule 5 à la cellule 15 fera une longueur égale à 10 cellules. Elle commence donc au noeud de la cellule 5 pour se terminer au noeud de la cellule 15 en d'autres termes la structure couvrira la cellule 5 mais s'arrêtera au début de la cellule 15.

Pour rendre les structures infinies, celles-ci doivent pénétrer dans les PMLs. Les couches PMLs se trouvent à l'extérieur du volume de calcul soit avant la coordonnée 1 ou après la coordonnée  $N_x+1$  (pour les PMLs normales à x). La deuxième section ci-dessous intitulée **milieu infini** explique comment régler les coordonnées pour rendre un milieu infini dans une, deux ou trois plusieurs directions.

#### Syntaxe et signification (identifiants de base)

Une ligne de données commence toujours par le nom d'un milieu ou le mot-clé 'metal' suivi de six coordonnées décrivant la position et la taille du parallélépipède élémentaire.

**\$C\_nom\_milieu** \$I\_imin \$I\_imax \$I\_jmin \$I\_jmax \$I\_kmin \$I\_kmax

-> Le milieu remplit chaque cellule contenu dans le parallélépipède défini par les six coordonnées.

nom\_milieu est le nom du milieu défini dans le bloc <milieu\_simple> ou <milieu\_dispersif>.

imin, imax, jmin, jmax, kmin et kmax : les coordonnées en nombre de cellules des extrémités du parallélépipède.

**metal** \$I\_imin \$I\_imax \$I\_jmin \$I\_jmax \$I\_kmin \$I\_kmax

-> metal est un mot-clé qui indique que le parallélépipède a ses six surfaces externes parfaitement conductrices. Le milieu interne au parallélépipède reste inchangé.

imin, imax, jmin, jmax, kmin et kmax : les coordonnées en nombre de cellules des extrémités du parallélépipède.

– Si les valeurs min et max sont égales suivant une direction alors la structure est une plaque parfaitement conductrice.

– Si les valeurs min et max sont égales suivant deux directions alors la structure est équivalente à un fil.

**non\_metal** \$I\_imin \$I\_imax \$I\_jmin \$I\_jmax \$I\_kmin \$I\_kmax

-> Cet identifiant définit une zone sur laquelle les surfaces conductrices sont retirées.

imin, imax, jmin, jmax, kmin et kmax : les coordonnées en nombre de cellules des extrémités du parallélépipède.

– Si les 6 coordonnées définissent un parallélépipède alors les surfaces conductrices (**metal**) sont retirées sur les 6 faces du parallélépipède sauf pour les 12 arêtes du parallélépipède qui restent parfaitement conductrices si elles l'étaient auparavant.

- Si les 6 coordonnées définissent une plaque alors celle-ci n'est plus de type **metal** mais les 4 arêtes de la plaques restent de type **metal** si elles l'étaient auparavant.
- Si les 6 coordonnées définissent un fil alors aucune intervention n'est produite.

**fente\_mince** \$R\_w\$ \$I\_{imin}\$ \$I\_{imax}\$ \$I\_{jmin}\$ \$I\_{jmax}\$ \$I\_{kmin}\$ \$I\_{kmax}\$ [\$C\_{modèle}]

-> La fente mince est appliquée sur une surface métallique qui doit avoir été défini à l'aide du mot clé **metal**. Elle est sans épaisseur comme les structures de type **metal**.

- $w$  est la largeur (en mètre) de la fente. Cette largeur doit être inférieure à la largeur de la cellule.
- $imin, imax, jmin, jmax, kmin$  et  $kmax$  : les coordonnées en nombre de cellules définissant la longueur de la fente, sa position et son plan. Sa position latérale (suivant sa largeur) est le milieu de la face d'une cellule FDTD. Le plan de la fente est l'un des trois plans cartésiens soit  $xOy$ ,  $yOz$  ou  $zOx$ . Dans la direction normale au plan de la fente, les coordonnées min et max doivent être égales. Dans la direction de la largeur de la fente, la coordonnées max est égale à la coordonnées min +1. Ces deux règles permettent de retrouver les informations sur la direction de la fente et son plan.

Par exemple, si la fente est plan  $xOy$  et que sa longueur fait 20 cellules dans la direction  $Ox$ , alors on devra avoir les relations suivantes :  $imax = imin + 20$  ;  $jmax = jmin + 1$  ;  $kmax = kmin$  ; position latérale de la fente = 0.5 ( $jmax + jmin$ ).

- La liste des mots clés pour les modèles de fentes minces ainsi que la permittivité équivalente dans la fente sont les suivantes :

- **tsf\_holland** : modèle par défaut,  $\varepsilon_{eq} = \frac{\Delta e}{\Delta h} \frac{K(\sqrt{1-w^2/\Delta e^2})}{K(\sqrt{w/\Delta e})}$  ;  $K$  est l'intégrale elliptique de première espèce.  $\Delta e$  est le pas spatial FDTD suivant la largeur de la fente et  $\Delta h$  est le pas spatial FDTD suivant la normale au plan de la fente.

- **tsf\_tixier** :  $\varepsilon_{eq} = \frac{2\Delta e}{\pi\Delta h} \ln \left( \frac{\Delta h}{w} \sqrt{\frac{\Delta e^2}{w^2} + 1} \right)$

- **tsf\_uniform** :  $\varepsilon_{eq} = \frac{\Delta e}{\Delta h}$

- **tsf\_riley\_turner** :  $\varepsilon_{eq} = \frac{\Delta e}{2\Delta h} \ln \left( \frac{2\Delta h}{w} + 1 \right)$

Signification de tsf : Thin Slot Formalism

**plaque\_mince** \$C\_{nom\_milieu}\$ \$R\_d\$ \$I\_{imin}\$ \$I\_{imax}\$ \$I\_{jmin}\$ \$I\_{jmax}\$ \$I\_{kmin}\$ \$I\_{kmax}\$

**non\_plaque\_mince** \$C\_{nom\_milieu}\$ \$R\_d\$ \$I\_{imin}\$ \$I\_{imax}\$ \$I\_{jmin}\$ \$I\_{jmax}\$ \$I\_{kmin}\$ \$I\_{kmax}\$

-> Le modèle de plaque mince est aussi désigné comme le modèle de Béranger. La structure plaque mince définit un matériau uniquement sur la surface des structures, c'est à dire qu'elle s'applique sur les faces externes des cellules touchant le parallélépipède défini par les coordonnées ( $imin, imax, jmin, jmax, kmin, kmax$ ). En conséquence, les matériaux remplissant les cellules contenues à l'intérieur ou à l'extérieur du parallélépipède ne sont pas modifiés.

- **\$C\_{nom\_milieu}** : le nom du milieu associé à la plaque
- $d$  est l'épaisseur (en mètre) de la plaque. Cette épaisseur doit être inférieure à l'épaisseur de la cellule FDTD.
- $imin, imax, jmin, jmax, kmin$  et  $kmax$  : les coordonnées en nombre de cellules des extrémités du parallélépipède.
  - Si les 6 coordonnées définissent un parallélépipède alors la structure forme une surface fermée mince et parallélépipédique
  - Si les valeurs min et max sont égales suivant une direction alors la structure est une plaque mince.

On peut supprimer en partie ou en totalité une surface de plaque mince en réglant la valeur de  $d$  à zéro. L'autre solution est d'utiliser le mot clé **non\_plaque\_mince** à la place de **plaque\_mince**. Dans ce cas, la valeur de  $d$  est ignorée ainsi que le nom du milieu.

**surface\_rugueuse** \$C\_{milieu\_inf}\$ \$C\_{milieu\_sup}\$ **xoy** \$I\_{imin}\$ \$I\_{imax}\$ \$I\_{jmin}\$ \$I\_{jmax}\$

`$I_kmin $I_kmax $C_nom_fichier [$R_ioffset $R_joffset]`

-> La surface rugueuse décrit une variation aléatoire de la hauteur d'un milieu

- `$C_milieu_inf` : le nom du milieu remplissant la partie du parallélépipède située en dessous de la surface rugueuse.
- `$C_milieu_sup` : le nom du milieu remplissant la partie du parallélépipède située au dessus de la surface rugueuse.
- `xoy` : Le plan de la surface est limité actuellement à l'unique plan xOy
- `imin, imax, jmin, jmax, kmin et kmax` : coordonnées du parallélépipède délimitant la surface rugueuse en nombre de cellules.
- `$C_nom_fichier` : nom du fichier décrivant la surface rugueuse. Le fichier est ordonné comme une matrice de valeurs :
  - Sur une ligne, la direction est Ox
  - Sur une colonne, la direction est Oy
  - Des lignes de commentaire peuvent être placées avec le symbole # et des lignes blanches peuvent être insérées.
  - Les valeurs du fichier sont de type entier. Elles correspondent à la hauteur en nombre de cellules entre la surface et le bas du parallélépipède.
  - Par défaut, les valeurs retenues de la matrice contenu dans le fichier commencent à partir de l'élément (1,1) du fichier (c'est à dire première ligne de valeurs, première colonne) et se terminent sur l'élément (jmax-jmin,imax-imin)
- `ioffset` et `joffset` : Nombre de valeurs ignorés dans le fichier suivant Ox et Oy respectivement. Dès lors, les valeurs retenues de la matrice contenu dans le fichier commencent à partir de l'élément (1+joffset,1+ioffset) et se terminent sur l'élément (jmax-jmin+joffset,imax-imin+ioffset)

Les structures élémentaires peuvent être décrites tout en étant réunies au sein d'une même famille représentant un objet. L'intérêt de l'approche est de pouvoir appliquer efficacement des traitements spécifiques sur un ensemble de structures élémentaires appartenant à un objet. Un exemple d'application est le calcul du champ lointain à partir des courants prélevés sur chaque structure surfacique parfaitement conductrice d'un objet. La description d'un objet se fait en deux étapes. Premièrement, l'objet est déclaré et le milieu associé est donné. Ensuite la liste des structures est décrites en dessous avec une ligne par structure élémentaire :

**OBJET\$nom**    `metal`

**OBJET\$nom**    `$C_nom_milieu`

L'identifiant s'appelle **OBJET** et **OBJET\$nom** constitue le nom de l'objet. `$C_nom_milieu` ou `metal` sont chacun un milieu associé à l'objet déclaré sur la même ligne. Ensuite, les structures élémentaires sont définies en dessous comme suit :

**ptminmax**    `$I_imin1 $I_imax1 $I_jmin1 $I_jmax1 $I_kmin1 $I_kmax1`

**ptminmax**    `$I_imin1 $I_imax1 $I_jmin1 $I_jmax1 $I_kmin1 $I_kmax1`

...

Chaque ligne décrit une structure parallélépipédique. Les coordonnées sont exprimées en nombre de cellules. Le début de chaque ligne doit commencer par l'identifiant **ptminmax**. La fin de la description des structures élémentaires de l'objet est détecté automatiquement lorsque l'identifiant de début de ligne n'est plus **ptminmax**.

### Milieux infinis

Les structures de type métal, milieu volumique quelconque (matériaux dispersif ou non dispersif), plaque mince et fente mince peuvent être semi-infinis ou infinis.

Pour que la structure soit infinie dans une direction, par exemple suivant x, il faut régler imin et imax tels que :

$$\text{imin} \leq 1 \text{ et/ou } \text{imax} \geq \text{nx}+1$$

nx est le nombre de cellules suivant la direction x qui est défini dans le bloc <volume\_calcul> (cf.§9.1). De même, pour une structure infinie dans les directions y ou z, on aura respectivement :

$$\text{jmin} \leq 1 \text{ et/ou } \text{jmax} \geq \text{ny}+1$$

$$\text{kmin} \leq 1 \text{ et/ou } \text{kmax} \geq \text{nz}+1$$

Bien entendu, pour que le milieu soit effectivement infini, des conditions absorbantes de type PML doivent être disposées sur les frontières (cf. §9.2) afin d'absorber les ondes sortantes.

#### Conseils :

- Les plaques minces parfaitement conductrices sont réalisées en égalisant les coordonnées suivant la normale à la plaque.
- Les fils minces parfaitement conducteurs peuvent être définis sur les arêtes des cellules en égalisant les coordonnées suivant chacune des deux normales à la direction du fil.
- En général, si un plan de masse infini sans ouverture est présent dans le volume de calcul, il sera placé sur une face externe du volume de calcul. En conséquence, il peut être remplacé par une condition aux frontières de type mur électrique sur la même face externe. Celle-ci pourra faire gagner beaucoup de temps de calcul par rapport à une condition absorbante de type PML.

#### Blocs requis :

Aucun, sauf si un milieu différent du conducteur parfait est présent. Dans ce cas, il doit être déclaré et défini dans l'un des deux blocs <milieu\_simple ou <milieu\_dispersif> qui sera placé avant le bloc <structure>

#### Ordre - Règle d'apparition

- Qu'est ce qu'il se passe lorsque le milieu d'une cellule est défini deux ou plusieurs fois ?  
La cellule contiendra le dernier milieu qui lui est affecté.
- le conducteur parfait identifié par le mot-clé 'metal' est toujours surfacique. Il n'inhibe donc pas le matériau contenu par chaque cellule

#### Exemple classique :

Le volume de calcul est supposé avoir une taille de 100\*100\*50 cellules. Voici quelques structures typiques de conducteurs parfaits.

```
<volume_calcul
    nxnynz      100   100  50   # volume utile en cellules
    dxdydz      1.0   1.0 1.0   # pas spatiaux, (mètre)
    duree_totale 2e-6    # duree totale de la simulation (seconde)
volume_calcul>
<structure
    # plaque métallique finie plan x0y
    metal  20 50  20 50  10  10
    # plaque métallique plan xoy, infinie dans les deux directions du plan
    metal 1 101  1 101 25 25
```

```

# Même signification car les coordonnées sont en dehors
# du volume utile suivant les directions x et y :
metal -5 120 -4 110 25 25

# fil conducteur parfait fini suivant x :
metal 10 90 50 50 40 40

structure>

```

### Exemple 1 : ligne de transmission

Quatre pistes parallèles de largeur 1 mm sont imprimées sur deux substrats d'épaisseur 1,6 mm et de constante diélectrique  $\epsilon_r = 4,5$  et 2,2, au dessus d'un plan de masse. Des absorbants PML sont placés autour pour tronquer le volume. L'alimentation et les charges aux extrémités des pistes ne sont pas données ici.

```

<volume_de_calcul
  nxnynz      30 150 37
  dxdydz      2.5e-3 0.2e-3 0.5333e-3
  duree_total 4e-9
volume_de_calcul>
<frontieres
  profil_pml_geometrique 8 1e-3 2.2
  mur_electrique xoyinf # c'est le plan de masse
frontieres>
<milieu_non_dispersif
  milieu diele1
    epsr 4.5
  milieu diele2
    epsr 2.2
milieu_non_dispersif>
<structure
  diele1 1 31 1 151 1 4 # substrat 1 infini
  diele2 1 31 1 151 4 7 # substrat 2 infini
  metal 5 25 65 69 4 4 # piste 1
  metal 5 25 81 85 4 4 # piste 2
  metal 5 25 55 59 7 7 # piste 3
  metal 5 25 35 39 7 7 # piste 4
structure>

```

### Exemple 2 : structures regroupées au sein d'un objet

L'exemple précédent est repris. Le résultat de la simulation sera le même avec la présentation suivante du bloc <structure> :

```

<structure
  OBJETsubstrat1 diele1
    ptminmax 1 31 1 151 1 4 # substrat 1

```

```

diele2 1 31 1 151 4 7 # substrat 2, pas d'objet associé
OBJET_pistes metal # 4 pistes regroupées au sein d'un objet

  ptminmax 5 25 65 69 4 4 # piste 1
  ptminmax 5 25 81 85 4 4 # piste 2
  ptminmax 5 25 55 59 7 7 # piste 3
  ptminmax 5 25 35 39 7 7 # piste 4

structure>

```

**Exemple 3 : Enceinte avec des plaques minces**

Il s'agit d'une enceinte fermée composée d'une tete et d'un corps avec une paroi externe d'épaisseur 3mm. On définit la tête, puis le corps et on supprime la plaque mince entre ces deux parties.

```

<volume_calcul
  nxnynz 50 18 18
  dxdydz 0.15 0.15 0.15
  duree_totale 10e-6
volume_calcul>
<milieu_simple
  milieu corps
    epsr 1.0
    sige 1000
  milieu tete
    epsr 3.0
    sige 10e-4
milieu_simple>
<structure
  plaque_mince tete 0.003 6 12 6 14 6 14
  plaque_mince corps 0.003 12 46 6 14 6 14
  non_plaque_mince corps 0.003 12 12 6 14 6 14
structure>

```

**Exemple 3 : Enceinte avec des plaques minces, du metal et une fente mince**

Il s'agit d'une enceinte fermée composée d'une tete en composite avec une paroi externe d'épaisseur 3mm et d'un corps en métal avec une fente mince sur sa partie supérieure. On définit le corps en métal sans sa paroi xinf. Puis on insère la fente mince sur la partie supérieure du corps. Enfin la tête est créée avec les plaques minces.

```

<structure
  metal 12 46 6 14 6 14
  non_metal 12 12 6 14 6 14
  fente_minceloy 3.0e-3 12 13 6 14 14 14 tsf_tixier
  plaque_mince tete 0.003 6 12 6 14 6 14
  non_plaque_mince tete 0.003 12 12 6 14 6 14
structure>

```

**Exemple 4 : Une surface rugueuse**

La surface rugueuse décrit une interface air-sol. Sa forme se trouve dans le fichier « `surrug.dat` ».

```
<volume_de_calcul
  nxnynz  245 100 30
  dxdydz  2 2 2
  duree_totale  1e-6
volume_de_calcul>
<milieu_simple
  milieu air
  epsr 1.0
  milieu sol
  epsr 3.0
milieu_simple>
<structure
  sol 1  246  1 101 1 12
  surface_rugueuse sol air xoy 1 241 10 90 2 25  surrug.dat
structure>
```

**10.3.2 Informations complémentaires****Représentation des structures****Conducteur parfait**

Les plaques parfaitement conductrices sont considérées comme ayant une épaisseur négligeable. Elles sont obtenues en imposant la condition  $\vec{E}_{\text{tangent}} = 0$  sur les arêtes des cellules parfaitement conductrices. C'est à dire que les composantes tangentielles du champ électrique sont forcées à zéro. Cependant, une imprécision subsiste au niveau des arêtes qui délimitent la surface conductrice (figure 10.1). La méthode FDTD voit les cellules du bord de la plaque plus grande que la réalité (erreur entre 20% et 50% de la taille de la cellule, fonction du maillage). Ceci peut s'expliquer en considérant que le calcul du champ par FDTD est précis si la variation spatiale du champ au sein d'une cellule est faible. Or, dans les cellules à proximité immédiate des discontinuités métalliques, le champ est très fort et varie très rapidement. En conséquence, la FDTD donnera des fréquences de résonance de la plaque légèrement inférieures aux valeurs de référence. Toutefois, elle traite parfaitement bien les réflexions sur la plaque qui ne sont que des variations d'ordre 1.

L'erreur peut être rectifiée en diminuant légèrement la taille de la plaque maillée. Par exemple, si on décide de corriger de 30% de la taille de la cellule la plaque dans la direction x, la largeur de la plaque en nombre de cellules sera de :

$$n_p = \frac{L_p}{\Delta x} - 2 * 0,3$$

Avec  $L_p$  la largeur de la plaque en mètres,  $\Delta x$  la taille de la cellule suivant la direction x en mètres,  $n_p$  le nombre de cellules et le facteur 2 indique que la correction tient compte des deux bords de la plaques.

**Interface entre deux milieux**

La méthode FDTD implique un espace discret, basé sur le schéma de Yee, dans lequel, sur un intervalle de temps  $\Delta t$ , les valeurs des composantes du champ électromagnétique sont considérées au sens de la valeur moyenne dans chaque cellule élémentaire. L'interface entre deux milieux s'étend alors sur l'épaisseur d'une cellule, dans laquelle, il faut déterminer les paramètres constitutifs du milieu.

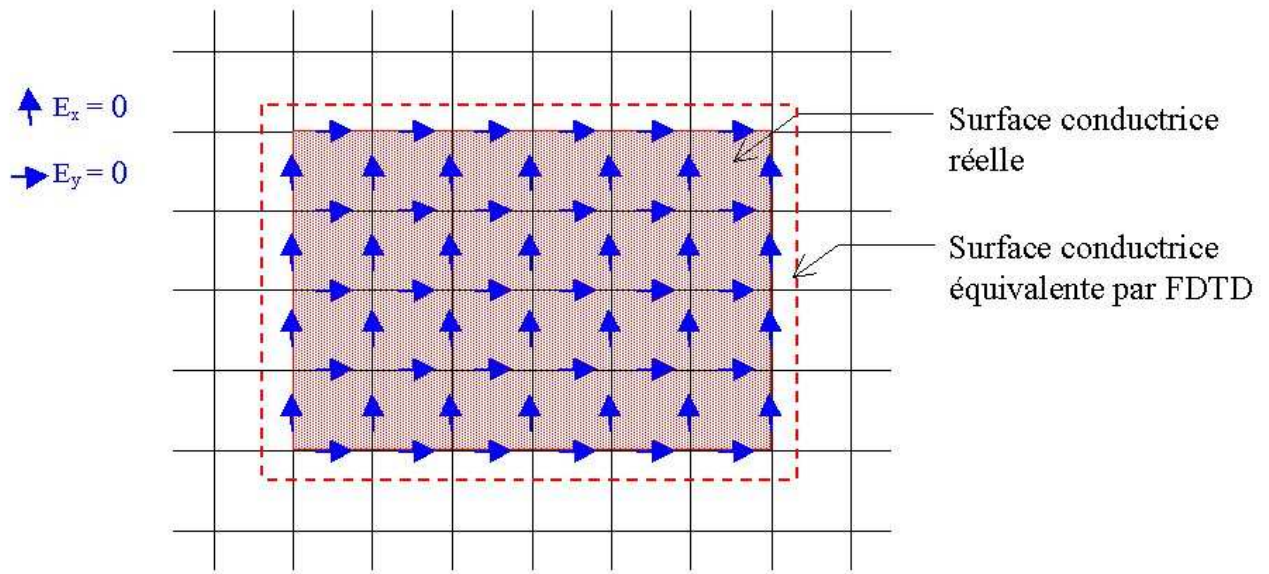


FIG. 10.1 – Condition aux limites d'une surface parfaitement conductrice.

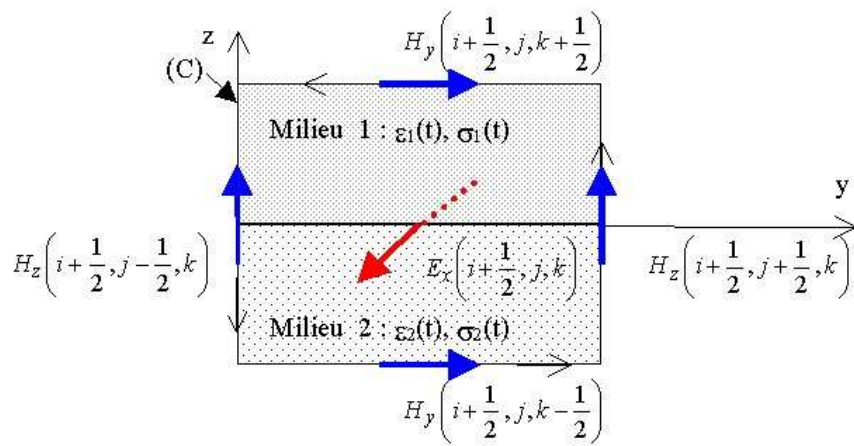


FIG. 10.2 – Interface plan xOy entre deux milieux.

Dans le cas d'une interface entre deux milieux diélectriques présentant des pertes électriques (figure 10.2), la permittivité et la conductivité, tangentielles à l'interface, sont définies par la moyenne arithmétique des permittivités et des conductivités des deux milieux situés de part et d'autre de l'interface :

$$\varepsilon_{interface} = \frac{\varepsilon_1 + \varepsilon_2}{2}$$

$$\sigma_{interface} = \frac{\sigma_1 + \sigma_2}{2}$$

Une situation plus générale apparaît sur les arêtes du parallélépipède constituant un milieu. La permittivité et la conductivité sur ces arêtes résultent de la moyenne arithmétique des permittivités et des conductivités de quatre milieux :

$$\varepsilon_{interface} = \frac{\varepsilon_1 + \varepsilon_2 + \varepsilon_3 + \varepsilon_4}{4}$$

$$\sigma_{interface} = \frac{\sigma_1 + \sigma_2 + \sigma_3 + \sigma_4}{4}$$

Si le contraste entre les deux milieux est fort, alors pour des raisons similaires à celle émise au paragraphe précédent, les deux expressions ci-dessus ne seront plus valables car elles reposent sur l'hypothèse d'un champ à variation faible dans la cellule. Un maillage fin sera alors nécessaire.

Une moyenne arithmétique est appliquée aussi à l'interface entre deux milieux dispersifs ou entre un milieu simple et un milieu dispersif. Si une conductivité fait partie du milieu dispersif, elle est moyennée avec la conductivité de l'autre matériau. Sur les arêtes du parallélépipède constituant un milieu dispersif, la moyenne arithmétique est effectuée avec les quatre permittivités (dispersives ou non) et les quatre conductivités qui entourent l'arête.

Dans le cas d'une interface entre deux milieux magnétiques, la perméabilité (qui est normale à l'interface) est rigoureusement définie à partir des deux milieux situés de part et d'autre de l'interface de la manière suivante :

$$\mu_{interface} = \frac{2\mu_1\mu_2}{\mu_1 + \mu_2}$$

Cependant, dans TRIDIMO, la moyenne arithmétique est appliquée car l'équation ci-dessus ne peut être traitée avec la présence d'un milieu dispersif magnétique.

# Chapitre 11

## Fonctions d'excitation et sources

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.

### 11.1 Fonctions sources, `<fonction_source>`

Rôle, syntaxe et théorie -> VOIR LE GUIDE TEMSI

#### 11.1.1 Exemples

##### 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>

```

## 11.2 Ondes planes, <onde\_plane>

### 11.2.1 Rôle et fonction

L'injecteur d'ondes planes permet de générer un champ incident en ondes planes à l'intérieur d'un parallélépipède qui est délimité par une boîte de Huygens (surface parallélépipédique fermée : 6 faces). En fait, celui-ci injecte des sources de courants électrique et magnétique sur la surface de Huygens. Les sources sont définies de telle sorte qu'elles permettent de rayonner un champ incident uniquement à l'intérieur de la boîte de Huygens (pour plus de détails, voir 11.2.2). La conséquence est une division du volume de calcul en deux zones de champ : la zone de champ total à l'intérieur de la boîte de Huygens (champ incident + champ diffracté par la structure à l'étude) et la zone de champ diffracté à l'extérieur de la boîte de Huygens (figure 11.4).

Quelles sont les possibilités offertes par le module <onde\_plane> ?

- Faire propager une onde plane incidente à l'intérieur d'une boîte de Huygens. La boîte de Huygens doit obligatoirement baigner dans un milieu homogène tel que le vide ou un milieu homogène (avec ou sans pertes) défini dans le bloc <volume\_calcul> (cf. §9.1). La structure à étudier doit se trouver obligatoirement à l'intérieur de la boîte de Huygens. Rien ne doit la traverser!!
- L'injecteur gère la réflexion sur un mur parfaitement conducteur et infini.
- Plusieurs ondes planes peuvent être injectées simultanément avec différents angles d'incidence. Une conséquence intéressante est la possibilité de générer une onde plane à polarisation circulaire ou elliptique.
- Un injecteur axial traite la propagation UNIQUEMENT EN INCIDENCE NORMALE à travers un milieu stratifié (plusieurs couches de matériaux différents, avec ou sans pertes mais non dispersifs!).
- Il est aussi possible de faire la propagation dans un espace 2D ou monodimensionnel en définissant une surface de Huygens avec 4 faces ou contours en 2D, 2 faces ou une face pour le 1D. En 2D, les 4 faces toucheront obligatoirement les deux murs électriques parallèles qui permettent de passer d'un volume 3D à un volume 2D (cf. §9.2). Même chose en 1D, et en outre, dans ce cas, la ou les deux faces devront toucher les deux murs magnétiques parallèles. Ces conditions préservent la fermeture de la boîte de Huygens car, sur les murs électriques et magnétiques, les courants électriques et magnétiques tangentiels sont nuls.
- La boîte de Huygens peut être ouverte pour des applications particulières (injection d'une onde dans un sol par exemple). Cependant, des réflexions parasites apparaîtront. On peut aussi envisager de faire pénétrer une surface de Huygens (avec une seule face) dans les PMLs (des perturbations auront lieu toutefois ...).

Les possibilités sont importantes aussi gardez vous donc de prendre des libertés sans en connaître les conséquences !

#### Syntaxe et signification (identifiants de base)

Les données à définir sont : les faces présentes de la boîte de Huygens, la taille de la boîte de Huygens, le ou les injecteurs (orientation de l'onde incidente, la polarisation du champ, la fonction sources, amplitude, phase et retard). Seules les propriétés `dim_huygens` et `injecteur` doivent être présentes dans ce bloc.

**surface** [`xoyinf`] [`xoysup`] [`yozin`] [`yoysup`] [`xozinf`] [`xozsup`]

-> Spécification des faces constituant la boîte de Huygens (six faces maximum possibles). Par défaut, les six faces sont supposées présentes. Il est donc nécessaire d'indiquer les faces que si leurs nombre est inférieur à six (c'est le cas en 2D ou 1D), sinon cette ligne de données n'a pas besoin d'être présente.

**dim\_huygens** \$I\_imin \$I\_imax \$I\_jmin \$I\_jmax \$I\_kmin \$I\_kmax

-> Dimension de la boîte de Huygens. Elle est définie par les coordonnées en nombre de cellules des deux extrémités min (imin,jmin,kmin) et max (imax,jmax,kmax) de la boîte (figure 11.4).

**injecteur** \$C\\_nom\\_fonction\\_source \$R\\_θ \$R\\_φ \$R\\_ψ \$R\\_A<sub>max</sub> [\$R\\_phase [\$R\\_retard]]

-> Définition de l'injecteur :

nom\_fonction\_source : nom de la fonction d'excitation déclaré dans le bloc <fonction\_source> qui est défini auparavant.

$\theta, \phi$  : angles en coordonnées sphériques (figure 11.1) indiquant la direction de propagation des ondes planes. Unité : degré.

$\psi$  : angle de polarisation (ou d'orientation) du vecteur champ  $\vec{E}$  défini dans le plan  $(\hat{\theta}, \hat{\phi})$  (figure 11.2). Unité degré.

$A_{max}$  : amplitude du champ électrique incident.

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 ??).

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.

**Syntaxe et signification** (identifiants complémentaires optionnels)

**mur\_electrique** \$C\_TypePlan

-> La présence d'un mur électrique ou d'un plan de masse infini nécessite de gérer la réflexion de l'onde plane sur celui-ci. L'identifiant « **mur\_electrique** » permet à TRIDIMO de prendre en compte automatiquement la réflexion sur celui-ci. Toutefois, il faut lui indiquer le positionnement de ce mur électrique. Tout d'abord, le positionnement et la dimension de la surface de Huygens feront que le mur électrique se superpose à l'une de ses six faces. Ainsi le type de plan pour le mur électrique sera une des six possibilités suivantes : **xoyinf**, **xoysup**, **yozin**, **yoysup**, **xozinf** ou **xoysup**. La face correspondante doit être retirée de la surface de Huygens (identifiant **surface**). Ainsi en 3D, en présence d'un mur électrique ou d'un plan de masse, 5 faces constitueront la surface de Huygens. En 2D, 3 faces au lieu de 4 constitueront la surface de Huygens.

Il est à noter que la spécification d'un mur électrique dans le bloc <onde\_plane> ne dispense pas de sa définition réelle en tant que structure qui doit avoir lieu soit dans le bloc <frontiere> ou dans le bloc <structure>.

**phase** \$R\_phase

-> Cet identifiant s'applique à tous les injecteurs définis en dessous (à moins d'un contre-ordre : redéfinition de la phase). Il s'agit donc de la phase en degré de la fonction source. Par défaut, elle vaut 0°. La phase s'applique que pour certaines fonctions sources (voir ??).

**retard** \$R\_retard

Cet identifiant s'applique à tous les injecteurs définis en dessous (à moins d'un contre-ordre : redéfinition du retard). Il s'agit donc du retard en seconde de la fonction source. Par défaut, il vaut 0s. La phase s'applique que pour certaines fonctions sources (voir ??).

**pt\_reference** \$C\_intervalle1 [\$C\_intervalle2] \$R\_i \$R\_j \$R\_k

-> Stockage d'un point de référence du champ incident qui doit se trouver obligatoirement à l'intérieur de la surface de Huygens. Les intervalles sont ceux définis dans le bloc <temps\_frequence>. Il est entendu que le bloc <temps\_frequence> doit être défini auparavant. Les coordonnées (i,j,k) sont exprimées en nombre de cellules, elles peuvent correspondre à un nombre non entier de cellule.

Le nom du fichier en temp est **pt\_reference\_t.\$extension**, **\$extension** est le nom de l'extension du fichier (cf. §13.1). Le tableau ci-dessous donne le format de stockage pour les résultats en temporel : Un fichier résultat en fréquence est associé si un intervalle en fréquence ou une liste de fréquences est spécifié. Le nom du fichier est **pt\_reference\_f.\$extension**.

**Syntaxe et signification** (identifiants particuliers pour les injecteurs en milieux stratifiés)

colonne 1	colonne 2	colonne 3	colonne 4	colonne 5
temps (S)	Amplitude, $E_\theta$	Amplitude, $E_\phi$	Amplitude, $H_\theta$	Amplitude $H_\phi$

TAB. 11.1 – Format du fichier de sortie en temps

colonne 1	col 2	col 3	col 4	col 5	col 6	col 7	col 8	col 9
fréquence (Hz)	$\Re(E_\theta)$	$\Im(E_\theta)$	$\Re(E_\phi)$	$\Im(E_\phi)$	$\Re(H_\theta)$	$\Im(H_\theta)$	$\Re(H_\phi)$	$\Im(H_\phi)$

TAB. 11.2 – Format des fichiers de sortie en fréquence, format de stockage : parties réelle et imaginaire

**milieu\_stratifie\_x**

Il indique que la boîte de Huygens traverse un milieu stratifié plan yOz et que la propagation se fait dans la direction (Ox). L'angle d'incidence sera spécifié suivant la direction(Ox) à la ligne de l'identifiant **injecteur**. C'est à dire :  $\theta = \pm 90^\circ$  et  $\phi = 0^\circ$  ou  $180^\circ$ .

**milieu\_stratifie\_y**

Il indique que la boîte de Huygens traverse un milieu stratifié plan xOz et que la propagation se fait dans la direction (Oy). L'angle d'incidence sera spécifié suivant la direction(Oy) à la ligne de l'identifiant **injecteur**. C'est à dire :  $\theta = \pm 90^\circ$  et  $\phi = \pm 90^\circ$ .

**milieu\_stratifie\_z**

Il indique que la boîte de Huygens traverse un milieu stratifié plan xOy et que la propagation se fait dans la direction (Oz). L'angle d'incidence sera spécifié suivant la direction(Oz) à la ligne de l'identifiant **injecteur**. C'est à dire :  $\theta = 0^\circ$  ou  $180^\circ$  pour l'injecteur axial (voir ci-dessous pour l'injecteur oblique en milieux stratifiés).

**Conseils :**

- Dans le cas de l'injecteur d'ondes planes en milieu homogène. La surface de Huygens doit baigner partout dans le même milieu. Par défaut, le milieu de propagation est l'air. Le milieu de propagation peut être d'un autre type. Dès lors, les paramètres électromagnétiques du milieu ( $\varepsilon_r \geq 1$ ;  $\mu_r \geq 1$ ;  $\sigma_e \geq 0$ ;  $\sigma_h \geq 0$ ) doivent impérativement être défini dans le bloc <volume\_calcul> (cf. §9.1) et pas dans le bloc <structure> car le milieu de propagation remplit tout le volume de calcul. Ce n'est strictement qu'à l'intérieur de la surface de Huygens que des structures peuvent être définies.
- Lire les infos complémentaires (cf.§11.2.2).

**Blocs requis :** <fonction\_source>.

**Ordre - Règle d'apparition**

Pas d'ordre pour les identifiants. Seul les propriétés **dim\_huygens** et **injecteur** doivent obligatoirement

$x$   
être présentes. les identifiants **milieu\_stratifié\_y** ne vous dispense pas de définir l'injecteur!  
 $z$

**Exemple classique :**

La propagation des ondes planes se fait dans le plan xOy avec un angle d'incidence  $\phi = 45^\circ$  ( $\theta = 90^\circ$ ). L'angle de polarisation est nulle. En conséquence, on a le champ électrique orienté suivant -z :

$$E_{inc} = E_\theta = -E_z$$

Bien qu'il n'y ait pas d'objet diffractant, le volume est entouré de PML absorbant les ondes sortantes. La fonction source est de type gaussien. L'amplitude de l'onde incidente est égale à 1.

<volume\_de\_calcul

```

    nxnynz  100 100 5
    dxdydz  2 2 2
    duree_totale  1.4e-6
volume_de_calcul>
<frontieres
    # pml par défaut
frontieres>
<fonction_source
    gaussienne  g1
        fmax  10e6
        att_fmax 10
fonction_source>
<temps_frequence  # nécessaire pour le point de référence
    IT1  # tout la durée par défaut
    IF1 0 10e6 0.1e6
temps_frequence>

<onde_plane
    # Les 6 faces par défaut pour la boîte de Huygens
    dim_huygens  5 95  5 95 2 4
    injecteur g1  90  45  0  1.0
    pt_reference IT1 IF1 50  50  3
onde_plane>

```

### Exemple 2 : réflexion sur un mur électrique

On reprend l'exemple précédent mais avec cette fois-ci un mur électrique infini plan yozsup. L'injecteur d'onde plane prend en compte la réflexion sur le mur électrique. Cependant, il faut lui dire qu'un mur électrique est présent. Voici les blocs qui changent par rapport à l'exemple précédent :

```

<frontieres
    mur_electrique yozsup
frontieres>
<onde_plane
    dim_huygens  5 95  5 95 2 4
    mur_electrique yozsup
    injecteur g1  90  45  0  1.0
onde_plane>

```

### Exemple 4 : polarisation circulaire.

On reprend le premier exemple mais on injecte cette fois-ci des ondes planes à polarisation circulaire :

```

<volume_de_calcul
    nxnynz  100 100 5
    dxdydz  2 2 2
    duree_totale  1.4e-6

```

```

volume_de_calcul>
<fonction_source
    gaussienne g1
        fmax 10e6
        att_fmax 10
    ondelette_rayleigh or1
        freq_de_amax 4e6
        ordre 3
fonction_source>
<onde_plane
    dim_huygens 5 95 5 95 2 4
    injecteur or1 90 45 0 1.0
    injecteur or1 90 45 0 1.0 90.0 #phase de 90°
onde_plane>

```

**Exemple 5 : passage en 2D.**

On reprend le premier exemple avec une propagation à 45° dans le plan xOy. Le mode est TM :

```

<volume_de_calcul
    nxnynz 100 100 1
    dxdydz 2 2 5 # le pas suivant z n'est pas utilisé ici
    duree_totale 1.4e-6
volume_de_calcul>
<frontieres
    mur_electrique xoyinf xoysup # passage en 2D
frontieres>
<fonction_source
    gaussienne g1
        fmax 10e6
fonction_source>
<onde_plane
    surface yozinf yozsup xozinf xozsup! 4 faces
    dim_huygens 5 95 5 95 1 2 # une cellule d'épaisseur suivant z !
    injecteur g1 90 45 0 1.0
onde_plane>

```

**Exemple 6 : passage en 1D.**

On suppose un problème mono-dimensionnel avec une propagation suivant Ox :

```

<volume_de_calcul
    nxnynz 100 1 1
    dxdydz 2 5 5 # les pas suivant y et z ne sont utilisés ici
    duree_totale 1.4e-6

```

```

volume_de_calcul>
<frontieres
    # spécification pour le 1D
    mur_electrique xoyinf xoysup
    mur_magnetique xozinf xozsup
frontieres>
<fonction_source
    gaussienne g1
    fmax 10e6
fonction_source>
<onde_plane
    surface yozinf yozsup
    dim_huygens 5 95 1 2 1 2 # une cellule d'épaisseur suivant y et z !
    injecteur g1 90 0 180 1.0 #  $E_z = +E_{inc}$ 
onde_plane>

```

### 11.2.2 Informations complémentaires

#### Angle d'incidence et polarisation

Le champ incident est calculé numériquement par une règle 1D. Le couple  $(E_{inc}, H_{inc})$  est évalué à chaque itération temporelle. Les vecteurs correspondants sont évidemment normaux à la direction de propagation. L'angle d'incidence des ondes planes est défini par le couple d'angles  $(\theta, \phi)$  dans le système des coordonnées sphériques tel que représenté sur la figure 11.1. Pour définir complètement la polarisation du champ, on a besoin d'introduire un troisième angle : l'angle de polarisation  $\psi$  que fait le vecteur champ  $\vec{E}_{inc}$  avec le vecteur unitaire  $\vec{\theta}$  des coordonnées sphériques (voir figure 11.2). Les relations suivantes sont déduites :

$$\begin{aligned}
 E_\theta &= E_{inc} \cos \psi & E_\phi &= E_{inc} \sin \psi \\
 H_\theta &= -H_{inc} \sin \psi & H_\phi &= H_{inc} \cos \psi
 \end{aligned}$$

Pour générer des ondes planes à polarisations elliptiques ou circulaires, deux injecteurs sont utilisés avec un déphasage d'un angle  $\alpha$  entre les champs incidents de chacun des deux injecteurs. Grâce à une excitation de type sino-gaussienne ou ondelette de Rayleigh (voir §??), le déphasage est maintenu constant sur toute la bande de fréquences :

$$E_{inc}^2(t) = E_{inc}^1(t) e^{j\alpha}$$

Ainsi, si la phase du premier injecteur est réglée à  $0^\circ$ , il suffit de mettre la valeur de la phase du second injecteur à  $90^\circ$  pour avoir une polarisation circulaire (nonobstant une amplitude égale sur les deux injecteurs).

Pour avoir le champ incident en coordonnées cartésiennes à partir de  $(E_{inc}, H_{inc})$ , les relations de passage des coordonnées sphériques vers les coordonnées cartésiennes sont appliquées :

$$\begin{aligned}
 E_{x,inc} &= E_{inc} (\cos \theta \cos \phi \cos \psi - \sin \phi \sin \psi) \\
 E_{y,inc} &= E_{inc} (\cos \theta \sin \phi \cos \psi + \cos \phi \sin \psi) \\
 E_{z,inc} &= E_{inc} (-\sin \theta \sin \psi)
 \end{aligned}$$

Ainsi, pour une direction de propagation suivant les x positifs et avec  $E_z = -E_{inc}$ , on aura :

$$\theta = 90^\circ ; \phi = 0^\circ ; \psi = 0^\circ$$

Pour une direction de propagation suivant les y positifs et avec  $E_z = +E_{inc}$ , on aura :

$$\theta = 90^\circ ; \phi = 90^\circ ; \psi = 180^\circ$$

Pour une direction de propagation dans le plan xOy suivant  $45^\circ$  d'angle et avec  $E_\phi = +E_{inc}$ , on aura :

$$\theta = 90^\circ ; \phi = 45^\circ ; \psi = 90^\circ$$

Pour une direction de propagation suivant les z négatifs et avec  $E_y = +E_{inc}$ , on aura :

$$\theta = 180^\circ ; \phi = 90^\circ ; \psi = 180^\circ$$

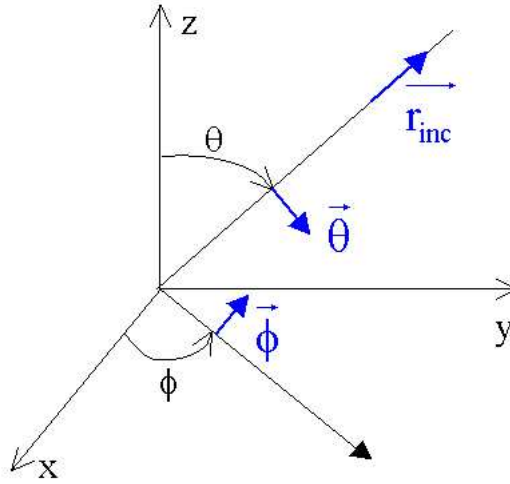
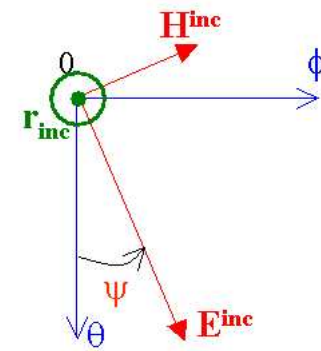


FIG. 11.1 – Coordonnées sphériques



$\Psi$  : angle de polarisation

FIG. 11.2 – Orientation du vecteur champ  $\vec{E}$  dans le plan  $(\hat{\theta}, \hat{\phi})$

### Champ diffracté-Champ total

Supposons un volume fini  $\Omega_t$  dépourvu de sources mais illuminé par un champ e.m.  $(E_{inc}, H_{inc})$  et contenant une structure diffractante. Ce volume est entouré par un espace infini  $\Omega_d$  qui est dépourvu d'obstacles

et contenant un champ e.m. se décomposant en un champ incident ( $E_{inc}, H_{inc}$ ) plus un champ diffracté ( $E_d, H_d$ ) provenant de la structure à l'étude (figure 11.3). On peut définir une surface de Huygens entourant le volume interne  $\Omega_t$ , sur laquelle on introduit des sources de courant électriques  $J_S$  et magnétiques  $M_s$  qui vont illuminer le volume interne de manière équivalente. au champ e.m. incident venant de  $\Omega_d$ . Avec cette démarche, le champ incident est confinée dans le volume fini  $\Omega_t$  et nul en dehors. Dès lors, deux zones distinctes apparaissent :

1. La zone de champ diffracté externe à la surface de Huygens fermée.
2. la zone de champ total interne à la surface de Huygens fermée.

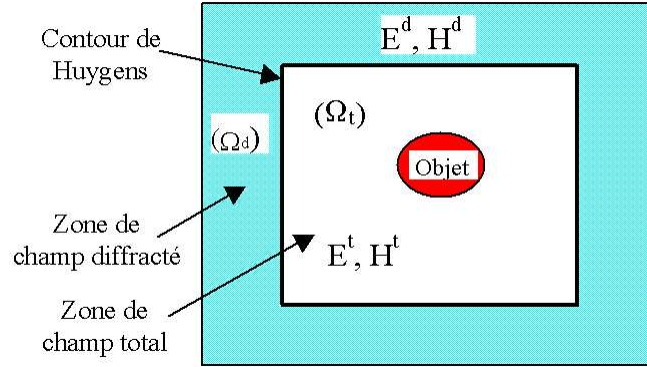


FIG. 11.3 – Les deux zones de champ

### Injecteur 1D

L'injecteur 1D est une méthode pour calculer le champ incident en tout point d'une surface de Huygens. Elle est basée sur le calcul du champ incident par une règle 1D différences finies. C'est à dire que les équations de Maxwell sont écrites dans l'espace discret au sens des différences centrées. Cette méthode a pour avantage, par rapport au calcul analytique, de minimiser les opérations flottantes et d'annihiler les conflits de dispersion numérique avec le volume de calcul 3D. Le couplage entre la règle 1D et le volume de calcul 3D est réalisé dans TRIDIMO avec des interpolations d'ordre 4 qui assurent la minimisation du champ résiduel.

Le schéma de la figure (11.4) représente le problème de l'injection de l'onde plane. Les surfaces de Huygens (en pointillées) sont dédoublées. Ceci est lié au caractère discret de l'espace et à la non colocalisation des composantes de E et H. Les coordonnées  $(i_{min}, j_{min}, k_{min})$  et  $(i_{max}, j_{max}, k_{max})$  délimitent la boîte de Huygens la plus interne et qui est en zone de champ total. La seconde surface de Huygens, décalée d'un demi-pas spatial, se trouve en zone de champ diffracté.

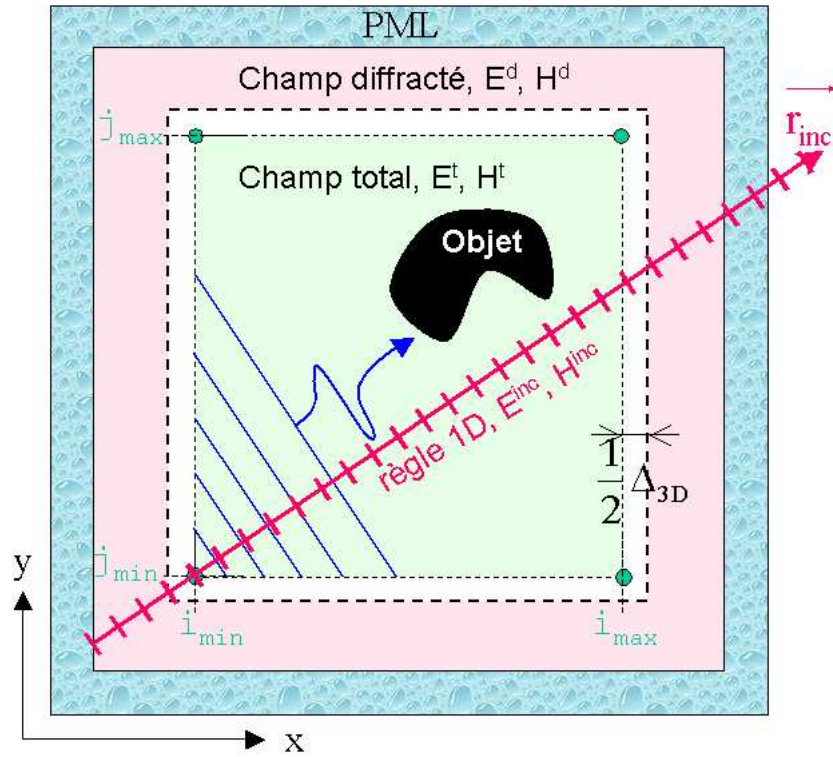


FIG. 11.4 – Règle 1D et injection du champ sur les surfaces dédoublées de Huygens

### 11.3 Source de tension, <source\_tension>

#### 11.3.1 Rôle et syntaxe

La source de tension (ou générateur de tension) est utilisée dans les alimentations ponctuelles des structures. Elle est introduite sur l'arête de la cellule élémentaire comme indiquée sur la figure 11.5. En fait, elle est positionnée exactement à l'endroit d'une composante du champ électrique.

Le générateur de tension peut être parfait ou doté d'une résistance interne. Le générateur de tension est relié obligatoirement à ces deux extrémités à un conducteur filaire ou plaqué. Dans le cas contraire, les résultats ne sont pas physiques.

#### Syntaxe et signification (identifiants de base)

Trois identifiants de base peuvent être utilisés pour la définition d'une source de tension. Le choix dépend simplement de l'orientation (x,y ou z) de la source :

**VX\$nom** \$C\_nom\_fonction\_source \$R\_Amax [\$R\_R0] \$I\_i \$I\_j \$I\_k

**VY\$nom** \$C\_nom\_fonction\_source \$R\_Amax [\$R\_R0] \$I\_i \$I\_j \$I\_k

**VZ\$nom** \$C\_nom\_fonction\_source \$R\_Amax [\$R\_R0] \$I\_i \$I\_j \$I\_k

-> **VX**, **VY** et **VZ** représente les identifiants des sources orientées respectivement suivant x,y et z.

Un nom spécifique peut être accolé à l'identifiant de chaque source (**\$nom**).

nom\_fonction\_source : nom de la fonction d'excitation déclaré dans le bloc <fonction\_source> qui est défini auparavant.

$A_{max}$  : amplitude de la fonction source

$R_0$  : résistance interne du générateur, ce paramètre est optionnel. Par défaut, elle vaut  $0\Omega$ .

$i, j$  et  $k$  : coordonnées en nombre de cellules suivant  $x, y$  et  $z$  respectivement de la source de tension (rappel : origine (1,1,1)).

**Syntaxe et signification** (identifiants complémentaires optionnels)

**phase** \$R\\_phase

-> Cet identifiant s'applique à toutes les sources de tension définies en dessous (à moins d'un contre-ordre : redéfinition de la phase). Il s'agit donc de la phase en degré de la fonction source. Par défaut, elle vaut 0°. La phase s'applique que pour certaines fonctions sources (voir ??).

**retard** \$R\\_retard

Cet identifiant s'applique à toutes les sources de tension définies en dessous (à moins d'un contre-ordre : redéfinition du retard). Il s'agit donc du retard en seconde de la fonction source. Par défaut, il vaut 0s.

**Syntaxe et signification** (identifiants pour les spécialistes)

**duree\_sources** \$R\\_t\_{max}

-> Cet identifiant s'applique à toutes les sources de tension définies en dessous (à moins d'un contre-ordre : redéfinition de  $t_{max}$ ). Par défaut, la source de tension est présente pendant toute la simulation. Au bout d'un temps  $t_{max}$ , on peut considérer que la tension d'alimentation est nulle et donc qu'elle peut être retirée. C'est à dire qu'au delà de  $t_{max}$ , la source est transparente, elle ne se comporte plus comme un fil chargé d'un point de vue des ondes arrivant dessus.

**Blocs requis** : <fonction\_source>

**Ordre - Règle d'apparition**

Pas d'ordre pour les identifiants.

**Exemple classique** :

```
<volume_de_calcul
  nxnynz  100 100 50
  dxdydz  2 2 2
  duree_totale  1.4e-6
volume_de_calcul>
<fonction_source
  gaussienne  g1
  fmax  10e6
fonction_source>
<source_tension
  # générateur parfait positionné en (40,40,10), d'amplitude 10 volts
  VX g1 10.0 40 40 10
  # générateur avec résistance interne de 50Ω positionné en (30,40,10)
  VY g1 10.0 50 30 40 10
source_tension>
```

### 11.3.2 Informations complémentaires

Le générateur de tension mis en oeuvre est celui de Piket-May et Taflove. Par exemple, pour un générateur orienté suivant Oz, la relation avec la composante  $E_z$  du champ est la suivante :

$$\frac{E_z^{n+1} + E_z^n}{2} = -\frac{V_{0z}^{n+\frac{1}{2}}}{\Delta z} + \frac{R_0}{\Delta z} I_z^{n+\frac{1}{2}} \quad (11.1)$$

$V_{0z}$  est la tension du générateur et  $R_0$  sa résistance interne (figure 11.5). Si la résistance  $R_0$  est nulle, le générateur représente en fait un conducteur filaire parfait de la longueur de la cellule doté d'une source de tension. Le courant  $I_z$  est relié à la densité de courant d'excitation de la cellule par la relation :

$$J_{z,exc} = \frac{I_z}{\Delta x \Delta y}$$

Cette densité de courant apparaît aussi dans l'équation de Maxwell-Ampère :

$$\nabla \wedge \vec{H} = \varepsilon \frac{\partial}{\partial t} \vec{E} + \sigma \vec{E} + \vec{J}_{exc} \quad (11.2)$$

Le système composé de (11.1) et (11.2) est résolu au sens des différences centrées au point  $(i, j, k + 1/2)$  pour donner :

$$E_z^{n+1} = \frac{1 - \frac{\Delta z \Delta t}{2\varepsilon_z R_0 \Delta x \Delta y}}{1 + \frac{\Delta z \Delta t}{2\varepsilon_z R_0 \Delta x \Delta y}} E_z^n + \frac{\frac{\Delta t}{\varepsilon_z}}{1 + \frac{\Delta z \Delta t}{2\varepsilon_z R_0 \Delta x \Delta y}} \left( \nabla \wedge \vec{H} \cdot \hat{z} - \frac{1}{R_0 \Delta x \Delta y} V_{0z}^{n+\frac{1}{2}} \right) \quad (11.3)$$

Si la résistance interne du générateur est nulle (générateur parfait), la composante  $E_z$  dépend directement du générateur :

$$E_z^{n+1} = -\frac{V_{0z}^{n+1}}{\Delta z}$$

Si la tension d'alimentation est nulle, il reste seulement la charge  $R_0$ . On déduit alors la relation suivante entre la conductivité  $\sigma_z$  de la cellule et la charge  $R_0$  :

$$\sigma_z = \frac{\Delta z}{R_0 \Delta x \Delta y}$$

La résistance cellulaire est donc équivalente à un milieu à pertes électriques axiales  $\sigma(0, 0, \sigma_z)$

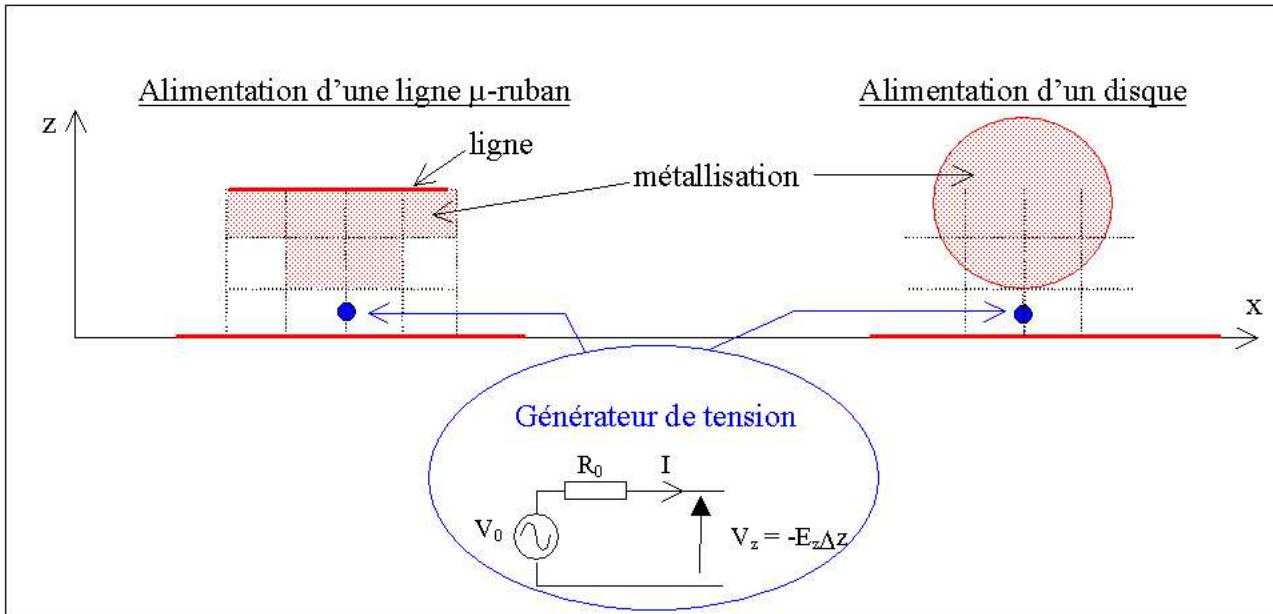


FIG. 11.5 – Excitation d'une ligne et d'un disque par un générateur de tension

## 11.4 Source de courant, <source\_courant>

### 11.4.1 Rôle et syntaxe

La source de courant (ou générateur de Norton) est utilisée pour alimenter des pistes imprimées. Elle est introduite sur l'arête de la cellule élémentaire comme indiquée sur la figure 11.6. En fait, elle est positionnée exactement à l'endroit d'une composante du champ électrique.

La source de courant parfaite (sans résistance en parallèle) est transparente. C'est pourquoi, elle peut être utilisée pour des problèmes monodimensionnels ou pour des problèmes où la source ne doit pas perturber les ondes qui la traversent. La source de courant devrait être reliée à ses deux extrémités par un conducteur filaire ou plaqué.

#### Syntaxe et signification (identifiants de base)

Trois identifiants de base peuvent être utilisés pour la définition d'une source de courant. Le choix dépend simplement de l'orientation (x,y ou z) de la source :

**IX\$nom** \$C\_fonction\_source \$R\_{A\_{max}} [\$R\_{R\_0}] \$I\_{imin} \$I\_{imax} \$I\_{jmin} \$I\_{jmax} \$I\_{kmin} \$I\_{kmax} [\$I\_{ipas} \$I\_{jpas} \$I\_{kpas}]

**IY\$nom** \$C\_fonction\_source \$R\_{A\_{max}} [\$R\_{R\_0}] \$I\_{imin} \$I\_{imax} \$I\_{jmin} \$I\_{jmax} \$I\_{kmin} \$I\_{kmax} [\$I\_{ipas} \$I\_{jpas} \$I\_{kpas}]

**IZ\$nom** \$C\_fonction\_source \$R\_{A\_{max}} [\$R\_{R\_0}] \$I\_{imin} \$I\_{imax} \$I\_{jmin} \$I\_{jmax} \$I\_{kmin} \$I\_{kmax} [\$I\_{ipas} \$I\_{jpas} \$I\_{kpas}]

-> **IX**, **IY** et **IZ** représentent les identifiants des sources orientées respectivement suivant x,y et z. Un nom spécifique peut être accolé à l'identifiant de chaque source (**\$nom**).

**fonction\_source** : nom de la fonction d'excitation déclarée dans le bloc <fonction\_source> qui est défini auparavant.

$A_{max}$  : amplitude de la fonction source.

$R_0$  : résistance interne du générateur, ce paramètre est optionnel. Par défaut elle vaut  $10^8 \Omega$ .

imin, imax, jmin, jmax, kmin, kmax : coordonnées en nombre de cellules des deux extrémités min (imin,jmin,kmin) et (imax,jmax,kmax) d'un parallélépipède contenant les sources d'excitation. Normalement, les valeurs min et max sont égales suivant au moins une direction.

ipas, jpas, kpas : répartition des sources avec un pas donné pour les trois direction x, y et z (en nombre de cellules). Ces paramètres sont optionnels. Par défaut, ils sont égaux à 1.

**Syntaxe et signification** (identifiants complémentaires optionnels)

**phase** \$R\_phase

-> Cet identifiant s'applique à toutes les sources de courant définies en dessous (à moins d'un contre-ordre : redéfinition de la phase). Il s'agit de la phase en degré de la fonction source. Par défaut, elle vaut 0°. La phase ne s'applique que pour certaines fonctions sources (voir ??).

**retard** \$R\_retard

Cet identifiant s'applique à toutes les sources de courant définies en dessous (à moins d'un contre-ordre : redéfinition du retard). Il s'agit du retard en seconde de la fonction source. Par défaut, il vaut 0s.

**Conseils :**

**Blocs requis :** <fonction\_source>

**Ordre - Règle d'apparition**

Pas d'ordre pour les identifiants.

**Exemple classique :**

```
<volume_de_calcul
  nxnynz  100 100 50
  dxdydz  2 2 2
  duree_totale  1.4e-6
volume_de_calcul>
<fonction_source
  gaussienne  g1
    fmax  10e6
fonction_source>
<source_courant
  # générateur parfait, d'amplitude 1A
  IX g1 1.0 3 6 10 10 5 7
  # générateur avec résistance interne de 50Ω
  IZ g1 10.0 50 3 6 10 10 5 7
source_courant>
```

#### 11.4.1.1 Informations complémentaires

Les sources de courant sont injectées dans l'équation de Maxwell-Ampère par l'intermédiaire de la densité de courant  $\vec{J}_{exc}$  :

$$\nabla \wedge \vec{H} = \varepsilon \frac{\partial}{\partial t} \vec{E} + \sigma \vec{E} + \vec{J}_{exc} \quad (11.4)$$

Le courant  $I_z$  est relié à la densité de courant d'excitation de la cellule par la relation :

$$J_{z,exc} = \frac{I_z}{\Delta x \Delta y}$$

Sous forme discrète, la solution pour la composante  $E_z$  au point  $(i, j, k + 1/2)$  devient :

$$E_z^{n+1} = \frac{1 - \frac{\Delta z \Delta t}{2\varepsilon_z R_0 \Delta x \Delta y}}{1 + \frac{\Delta z \Delta t}{2\varepsilon_z R_0 \Delta x \Delta y}} E_z^n + \frac{\frac{\Delta t}{\varepsilon_z}}{1 + \frac{\Delta z \Delta t}{2\varepsilon_z R_0 \Delta x \Delta y}} \left( \nabla \wedge \vec{H} \cdot \hat{z} - \frac{1}{\Delta x \Delta y} I_{z,exc}^{n+\frac{1}{2}} \right) \quad (11.5)$$

$I_{z,exc}$  est la source de courant et  $R_0$  la résistance interne du générateur de Norton. Si la source de courant est parfaite, la relation 11.6 devient :

$$E_z^{n+1} = E_z^n + \frac{\Delta t}{\varepsilon_z} \left( \nabla \wedge \vec{H} \cdot \hat{z} - \frac{1}{\Delta x \Delta y} I_{z,exc}^{n+\frac{1}{2}} \right) \quad (11.6)$$

Un exemple typique d'utilisation de la source de courant est l'alimentation d'une piste au dessus d'un plan de masse par une nappe de courant (figure 11.6).

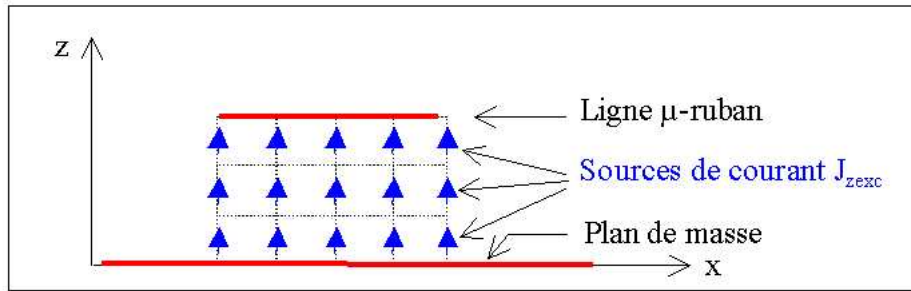


FIG. 11.6 – Excitation d'une ligne imprimée par des sources de courant (plan de coupe)

# Chapitre 12

## Structures filaires

### 12.1 Fils de Holland, $\langle \text{structure\_fil} \rangle$

#### 12.1.1 Rôle et syntaxe

Les structures filaires offrent la possibilité de traiter des fils dont leurs rayons sont très inférieurs aux dimensions transverses de la cellule. Les fils de Holland sont obligatoirement parallèles aux axes cartésiens. La méthode est basée sur le formalisme filaire de Holland (voir § 12.1.2). Comme les structures, chaque fil est découpé en segments élémentaires dont la longueur correspond à la dimension de la maille FDTD suivant la direction du fil.

Voici les fonctions complémentaires avec les structures filaires :

- Dans chaque segment de fil, une résistance, une capacité et une inductance peuvent être insérées en série sur le fil.
- Sur un segment de fil, un générateur de tension ou de courant peut-être inséré sur le fil. Il pourra être mis en série sur le même segment avec une charge de type RLC série.
- Des jonctions peuvent être réalisées entre fils de diamètres différents ou entre fils perpendiculaires. Les jonctions entre fils peuvent être détectées automatiquement sans problème.
- La traversée d'une interface entre deux milieux par un conducteur est gérée par deux fils (à chaque milieu, un fil spécifique) et la jonction entre les deux fils à l'interface est correctement traitée par une jonction Fil-Fil ou JNF (voir ci-dessous).
- Les fils peuvent être plongés dans un milieu diélectrique sans pertes ou avec pertes. Les pertes du milieu sont prises en compte à partir de la conductivité du milieu qui est intégrée à l'équation de la charge du formalisme des fils minces de Holland. Le type de milieu dans lequel est plongé le fil, est détecté automatiquement.
- Les fils peuvent être connectés à des plaques conductrices. Ils peuvent être infinis en les faisant pénétrer dans les PML (condition aux frontières absorbantes).

On commence par définir les fils : leurs longueurs et leurs positions en nombre de cellules puis leurs rayons. Ensuite, en dessous, on décrit les éléments localisés sur des segments de fils (charge, générateur). Enfin, la dernière étape est la description des jonctions entre les fils ou fil-plaque ou fil-pml. Les jonctions fil-fil n'ont lieu qu'aux extrémités des fils.

Les coordonnées des segments des fils sont définies relativement à l'extrémité initiale du fil  $(i_{min}, j_{min}, k_{min})$ . Le premier segment du fil a pour coordonnée 1 et le dernier segment  $nb\_segment$  ( $nb\_segment = (i_{max} - i_{min})$ ) si le fil est dans la direction Ox).

MISE EN GARDE : Un critère de stabilité spécifique au fil mince (12.13) fixe un pas temporel maximal pour la simulation. Si celui-ci n'est pas respecté, TRIDIMO s'arrête et propose une valeur pour l'identifiant cdtmax (cf. bloc <volume\_calcul>, §9.1) qui permet de réduire le pas temporel et préserver ainsi la stabilité du schéma FDTD et du formalisme des fils minces.

### Syntaxe et signification (IDENTIFIANTS DE BASE)

**F\$nom** \$I\_{i\_{min}} \$I\_{i\_{max}} \$I\_{j\_{min}} \$I\_{j\_{max}} \$I\_{k\_{min}} \$I\_{k\_{max}} \$R\_{rayon}

**F\$nom** \$I\_{i\_{min}} \$I\_{i\_{max}} \$I\_{j\_{min}} \$I\_{j\_{max}} \$I\_{k\_{min}} \$I\_{k\_{max}} \$R\_{rayon} [ \$R\_{\delta x} \$R\_{\delta y} ]

-> Définition d'un fil. **F** est l'identifiant du fil. Un nom lui est accolé **\$nom**. L'ensemble **F\$nom** est le nom complet du fil. Ensuite, les coordonnées du fil du point min ( $i_{min}, j_{min}, k_{min}$ ) et max ( $i_{max}, j_{max}, k_{max}$ ) en nombre de cellules sont données. Suivant les deux axes du repère transverse à la direction du fil, les coordonnées min et max sont égales. Par exemple pour un fil orienté suivant Ox, on aura  $i_{max} > i_{min}$ ,  $j_{min} = j_{max}$  et  $k_{min} = k_{max}$ . Le premier segment du fil a toujours pour coordonnée 1 et le dernier ( $i_{max} - i_{min}$ ) si le fil est orienté suivant Ox.

La dernière valeur de la ligne est le rayon du fil en mètre.

$\delta x, \delta y, \delta z$  : paramètres optionnelles, ce sont les décalages du fil par rapport à l'origine de la cellule (figure ??). Unité : le mètre. Le fil ne peut pas être décalé longitudinalement. En conclusion, si le fil est orienté suivant Ox, il ne pourra pas être décalé suivant x ( $\delta x = 0$ ). Les valeurs des décalages ne doivent pas être supérieures en valeur absolue aux pas spatiaux :

$$-\Delta x < dx < \Delta x ; -\Delta y < dy < \Delta y ; -\Delta z < dz < \Delta z$$

Une contrainte majeur SI LE FIL EST DÉCALÉ DANS LA CELLULE alors LES JONCTIONS FIL-FIL NE MARCHE PAS !

**OBJET\_FIL\$nom** **F\$nom1** **F\$nom2** ... **F\$nomN**

-> Déclaration et définition d'un objet constitué de fils. **OBJET\_FIL** est l'identifiant et **OBJET\_FIL\$nom** est le nom de l'objet. Sur la même ligne, la liste des noms de fils appartenant à l'objet est donnée. Ces fils doivent impérativement avoir été définis auparavant. Actuellement, les objets fils servent pour calculer le champ lointain à partir des courants circulant sur chacun des fils de l'objet (voir §13.10).

On peut définir autant d'objets que l'on veut. Un fil peut appartenir à plusieurs objets.

### Syntaxe et signification (CHARGES, GÉNÉRATEUR, IMPÉDANCE ET QUADRIPOLE)

**R\$nom** **F\$nom** \$I\_{n^{\circ}segment} \$R\_{R}

-> Définition d'une résistance sur un segment.

**F\$nom** : nom du fil qui contient la résistance.

**n<sup>o</sup>segment** : numéro du segment du fil contenant la résistance, relativement à l'origine ( $i_{min}, j_{min}, k_{min}$ ) du fil. Le premier segment a pour valeur 1.

**R** : la valeur de la résistance en ohm.

**C\$nom** **F\$nom** \$I\_{n^{\circ}segment} \$R\_{C}

-> Définition d'une capacité sur un segment.

**F\$nom** : nom du fil qui contient la capacité.

**n<sup>o</sup>segment** : numéro du segment du fil contenant la capacité, relativement à l'origine ( $i_{min}, j_{min}, k_{min}$ ) du fil. Le premier segment a pour valeur 1.

**C** : la valeur de la capacité (F/m).

**L\$nom** **F\$nom** \$I\_{n^{\circ}segment} \$R\_{L}

-> Définition d'une self sur un segment.

**F\$nom** : nom du fil qui contient la self.

n°segment : numéro du segment du fil contenant la self, relativement à l'origine  $(i_{min}, j_{min}, k_{min})$  du fil. Le premier segment a pour valeur 1.

L : la valeur de la self (H/m).

**GV\$nom** **F\$nom** \$I\_n°segment \$C\_fonction\_source \$R\_A<sub>max</sub> \$R\_R<sub>0</sub>

-> Description du générateur de tension. L'identifiant est **GV** et **GV\$nom** est le nom du générateur.

**F\$nom** : nom du fil qui contient le générateur

n°segment : numéro du segment du fil contenant le générateur, relativement à l'origine  $(i_{min}, j_{min}, k_{min})$  du fil. Le premier segment a pour valeur 1.

$A_{max}$  : amplitude de la fonction source.

$R_0$  : résistance interne du générateur. Si une charge  $R$  est définie sur le même segment, elle s'ajoutera à  $R_0$ .

**GI\$nom** **F\$nom** \$I\_n°segment \$C\_fonction\_source \$R\_A<sub>max</sub> \$R\_R<sub>0</sub>

-> NON TRAITÉ ACTUELLEMENT. Description du générateur de courant. L'identifiant est **GI** et **GI\$nom** est le nom du générateur.

**F\$nom** : nom du fil qui contient le générateur

n°segment : numéro du segment du fil contenant le générateur, relativement à l'origine  $(i_{min}, j_{min}, k_{min})$  du fil. Le premier segment a pour valeur 1.

$A_{max}$  : amplitude de la fonction source.

$R_0$  : résistance interne du générateur. Si une charge  $R$  est définie sur le même segment, elle s'ajoutera à  $R_0$ .

### Syntaxe et signification (IDENTIFIANTS COMPLÉMENTAIRES OPTIONNELS)

**phase** \$R\_phase

-> Cet identifiant s'applique à tous les générateurs de courant ou de tension définis en dessous (à moins d'un contre-ordre : redéfinition de la phase). Il s'agit de la phase en degré de la fonction source. Par défaut, elle vaut 0°. La phase ne s'applique que pour certaines fonctions sources (voir ??).

**retard** \$R\_retard

Cet identifiant s'applique à tous les générateurs de courant ou de tension définis en dessous (à moins d'un contre-ordre : redéfinition du retard). Il s'agit du retard en seconde de la fonction source. Par défaut, il vaut 0s.

### Syntaxe et signification (LES JONCTIONS)

Par défaut, les extrémités des fils sont en circuit ouvert (non connectés).

Lorsque le fil a une extrémité en circuit ouvert, la condition appliquée sur le noeud extrémité est la nullité du courant, soit en appliquant le principe des images, on déduit la relation pour la mise à jour de la charge :

$$Q_1^{n+1} = Q_1^n - 2 \frac{\Delta t}{\Delta} I_{1+0.5}^{n+1/2} \text{ pour l'extrémité initiale}$$

$$Q_{N+1}^{n+1} = Q_{N+1}^n + 2 \frac{\Delta t}{\Delta} I_{N-0.5}^{n+1/2} \text{ pour l'extrémité finale}$$

Lorsque le fil est en court-circuit, on applique simple la condition de charge nulle :

$$Q_1^{n+1} = 0 \text{ pour l'extrémité initiale}$$

$$Q_{N+1}^{n+1} = 0 \text{ pour l'extrémité finale}$$

$N$  est le nombre de segments,  $\Delta$  la longueur d'un segment de fil. En conséquence, l'extrémité du fil est toujours sur un noeud qu'elle soit en circuit ouvert ou en court-circuit.

#### **jonction\_fil cc**

-> Tous les fils déclarés en dessous de cette ligne auront leurs extrémités en court-circuit (valide jusqu'à un contre ordre).

#### **jonction\_fil co**

-> Tous les fils déclarés en dessous de cette ligne auront leurs extrémités non connectés (circuit ouvert, valide jusqu'à un contre-ordre).

**JFP\$nom**    **deb**    **F\$nom**  
              **fin**

-> Jonction fil-plaque. L'identifiant est **JFP** et **JFP\$nom** est le nom de la jonction. Le fil est connecté à un conducteur ou un milieu très conducteur.

**deb** : indique l'extrémité du fil connecté soit l'extrémité début (**deb**) ou l'extrémité finale (**fin**).  
**fin**

**F\$nom** : nom du fil concerné par la jonction.

**JFV\$nom**    **deb**    **F\$nom**  
              **fin**

-> Jonction fil - circuit ouvert. L'identifiant est **JFV** et **JFV\$nom** est le nom de la jonction. L'extrémité du fil spécifiée est en circuit ouvert.

**deb** : indique l'extrémité du fil connecté soit l'extrémité début (**deb**) ou l'extrémité finale (**fin**).  
**fin**

**F\$nom** : nom du fil concerné par la jonction.

**JPML\$nom**    **deb**    **F\$nom**  
              **fin**

**JPML\$nom deb fin F\$nom**

-> Jonction fil-PML. L'identifiant est **JFP** et **JFP\$nom** est le nom de la jonction. Le fil pénètre dans les PMLs du côté de l'extrémité indiquée (deb ou fin).

**deb** : indique l'extrémité du fil connecté soit l'extrémité début (**deb**) ou l'extrémité finale (**fin**). Les  
**fin**

deux extrémités peuvent être en jonction fil-PML. Dans ce cas, l'indication se fait sur la même ligne.

**F\$nom** : nom du fil concerné par la jonction.

**jnf\_non\_auto** # par défaut

**jnf\_auto**

-> le mot clé **jnf\_auto** permet de faire une détection automatique des jonctions entre fils. Une jonction entre fils est détectée dès qu'il y a un croisement entre deux fils ou plus. Ce qui veut dire que la jonction peut avoir lieu sur n'importe quel noeud du fil, pas seulement aux extrémités. Attention, les fils doivent impérativement être disposés sur les arêtes des mailles FDTD. Le décalage du fil au sein de la cellule ne permet pas de gérer correctement les jonctions entre fils.

Par défaut, il n'y a pas de détection automatique. Dès lors, l'utilisateur doit indiquer toutes les coordonnées des noeuds où un croisement de fil a lieu (voir l'identifiant **JNF** ci-dessous pour cela). Le solveur détecte automatiquement tous les fils qui touchent le noeud.

**JNF** \$I\_i \$I\_j \$I\_k

-> Jonction entre fils au point de coordonnées (i,j,k) exprimées en nombre de cellules. **TRIDIMO** recherche automatiquement tous les fils qui touchent ce point (6 fils maximum). Il détecte aussi si le point de contact avec un fil a lieu à une de ses extrémités ou sur l'un de ses noeuds. Ce qui veut dire qu'il gère aussi les croisements de fils.

**JFF\$nom** \$I\_nb-fil

-> Jonction fil-fil (obsolète, préférer **JNF**). L'identifiant est **JFF** et **JFF\$nom** est le nom de la jonction. Jonction entre deux ou plusieurs fils. Cette jonction est transformée par TRIDIMO en une jonction JNF dont la gestion est plus générale et efficace.

*nb-fil* : nombre de fils concernés par la jonction.

En dessous, il faudra définir les nb-fil concernés par la jonction avec un fil par ligne :

```
deb  F$nom
fin
```

Avec :

```
deb  : indique l'extrémité du fil connecté soit l'extrémité début (deb) ou l'extrémité finale (fin).
fin
```

**F\$nom** : nom du fil concerné par la jonction.

### Syntaxe et signification (POUR LES SPÉCIALISTES!!!)

**epsr** \$R\_ε<sub>r</sub>

-> Par défaut, la permittivité appliquée sur le fil est la permittivité de la cellule. Cette valeur peut être modifiée grâce à l'identifiant **epsr**. Unité de ε<sub>r</sub> : F/m. L'identifiant et sa valeur s'appliquent à tous les fils définis en dessous jusqu'au prochain contre ordre.

**disque** \$R\_rayon

-> Par défaut, le formalisme de Bérenger - Holland est appliqué. Cependant, les résultats sont variables en fonction de la position du fil dans la cellule du fait que le courant est distribué uniquement sur la surface de la maille transverse au fil. Pour appliquer le formalisme amélioré, il faut redéfinir la distribution du courant sur un disque avec un rayon tel que :  $0,6 \times \text{Max}(\Delta_{\text{transverse}}) \leq \text{rayon} \leq 1,2 \times \text{Max}(\Delta_{\text{transverse}})$ . Δ<sub>transverse</sub> correspond aux deux pas spatiaux transverses au toron. Si vous ne savez pas quoi choisir, prener :  $\text{rayon} = 0,8 \times \text{Max}(\Delta_{\text{transverse}})$ . L'identifiant et sa valeur s'appliquent à tous les fils définis en dessous jusqu'à un contre ordre.

**moyenne\_champ\_sur\_rectangle**

-> Impose un moyennage du champ à partir d'une interpolation bilinéaire réalisée au sein de la cellule contenant le fil (concerne le formalisme amélioré seulement). Le champ moyen est inséré dans la mise à jour du courant. L'identifiant et sa valeur s'appliquent à tous les fils définis en dessous (pas de contre-ordre possible).

**Blocs requis** : <fonction\_source> si présence d'un générateur

### Conseils - Règle d'apparition

- La description des charges, des générateurs et des jonctions doivent apparaître après la définition des fils concernés.
- Un fil doit obligatoirement être plongé dans un milieu homogène. *Si un conducteur traverse une interface entre deux milieux alors il faut définir deux fils*, chacun plongé dans un unique milieu. La jonction à l'interface entre deux milieu est traitée correctement par une jonction entre fils.
- Les fils peuvent être plongés dans un milieu diélectrique sans pertes ou avec pertes. Les pertes du milieu sont prises en compte à partir de la conductivité du milieu qui est intégrée à l'équation de la charge du formalisme des fils minces de Holland. Le type de milieu dans lequel est plongé le fil, est détecté automatiquement.
- *Les fils ne peuvent pas se trouver dans un milieu dispersif!*

**Exemple classique** : MONOPOLE AU DESSUS D'UN PLAN DE MASSE INFINI, FRÉQUENCE QUART-D'ONDE :  
 $F_0 = 4,8 \text{ MHz}$

```
<volume_de_calcul
  nxnynz 40 10 10
  dxdydz 0.5 2 2
  duree_total 3e-6
```

```

volume_de_calcul>
<frontieres
    mur_electrique yozinf # le plan de masse
frontieres>
<generateur
    gaussienne gauss
        fmax 20e6 # la fréquence maximale
        att_fmax 10
generateur>
<structure_fil
    Fil1 1 31 6 6 6 6 2e-3 # rayon 2 mm
    GV1 Fil1 1 gauss 1.0 50 # l'alimentation
    JFP1 deb Fil1 # jonction fil - plan de masse
    # L'extrémité fin reste en circuit ouvert
structure_fil>
# Résultat : courant et impédance d'entrée
<temps_frequence
    IF1 0 20e6 50e3
    IT1
temps_frequence>
<resultat_structure_fil
    I1 IT1 IF1 Ffil1 1
    ZE1 IF1 GV1
resultat_structure_fil>

```

### Exemple 2 : ALIMENTATION D'UNE ANTENNE PATCH

Une antenne patch à bande étroite ( $f_0 = 4,1\text{ GHz}$ ) est imprimée sur un substrat époxy ( $\varepsilon_r = 4,5$ ) d'épaisseur 1,56 mm. Un plan de masse est imprimé sur l'autre face du substrat. Le patch est alimenté par une sonde modélisée ici par un fil. Le générateur est placé à la base du fil. La taille du patch est  $16 \times 30$  mm. La sonde est positionnée dans un coin avec les décalages ( $x=2\text{ mm}, y=6\text{ mm}$ ) par rapport au coin.

```

<volume_calcul
    nxnynz 40 60 10 #cellules
    dxdydz 0.96e-3 0.98e-3 0.52e-3 #mètres
    duree_totale 8e-9
volume_calcul>
<frontieres
    # par défaut, absorbant PML autour
    mur_electrique xoyinf # plan de masse
frontieres>
<milieu_simple
    milieu epoxy
        epsr 4.5
milieu_simple>
<structure

```

```

    epoxy 1 41 1 61 1 4 # substrat époxy infini
    metal 12 28 15 45 4 4 # le patch

structure>
<fonction_source
    sino_gaussienne sgauss
        freq_centrale 4e9 # 4 GHz
        bande_freq 2e9 #  $\pm 2$  GHz autour de freq_centrale
        att_fmax 10
fonction_source>
<structure_fil
    Fil1 14 14 39 39 1 4 0.2e-3
    GV1 Fil1 1 sgauss 1.0 50.0
    JFP1 deb Fil1
    JFP1 fin Fil1
structure_fil>
<temps_frequence
    IF1 2e9 6e9 20e6
    IT1
temps_frequence>
<resultat_structure_fil
    I1 IT1 IF1 Fil1 1
    ZE1 IF1 GV1
resultat_structure_fil>

```

**Exemple 3 : FIL COUDÉ (SUIVANT X PUIS Y)**

Un fil est dans la direction x et un deuxième suivant la direction y. Une jonction fil-fil est réalisé entre les deux fils alors que les autres extrémités pénètrent dans les PMLs.

```

<volume_de_calcul
    nxnynz 100 30 12
    dxdydz 1.0 1.0 1.0
    duree_total 2e-6
volume_de_calcul>
<fonction_source
    gaussienne g
        fmax 10e6
fonction_source>
<structure_fil
    F1 1 90 5 5 7 7 0.01
    F2 90 90 5 31 7 7 0.01
    GV1 F1 5 g 1.0 0.0
    JPML deb F1
    JPML fin F2
    JNF 90 5 7
structure_fil>

```

### 12.1.2 Informations complémentaires

Holland et Simpson [10] ont proposé un formalisme pour intégrer dans la méthode FDTD des fils dont le diamètre est inférieur à la taille de la cellule élémentaire. Considérons un tronçon de fil au sein d'une cellule dirigée suivant l'axe (Oz) comme sur la figure 12.1. Holland propose d'évaluer le courant  $I$  et la charge  $Q$  dans la cellule, en fonction du champ électromagnétique de celle-ci, suivant les lois de l'électrostatique et de la magnétostatique :

$$H_\theta = \frac{I}{2\pi\rho} \quad (12.1)$$

$$E_\rho = \frac{Q}{2\pi\varepsilon_0\rho} \quad (12.2)$$

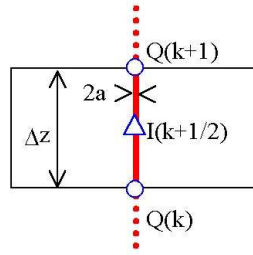


FIG. 12.1 – Tronçon de fil mince sur une arête d'une cellule

$E_\rho$  et  $H_\theta$  sont deux composantes du champ dans un repère en coordonnées cylindriques  $(\rho, \theta, z)$  dont l'origine est sur le fil. Ensuite, on utilise les équations vectorielles de Maxwell exprimées en coordonnées cylindriques. De celles-ci, on retient seulement les équations projetées qui contiennent les composantes  $H_\theta$ ,  $E_\rho$ ,  $E_z$ , c'est à dire les composantes qui ont une interaction avec un fil infiniment long orienté suivant Oz :

$$-\mu_0 \frac{\partial H_\theta}{\partial t} = \frac{\partial E_\rho}{\partial z} - \frac{\partial E_z}{\partial \rho} \quad (12.3)$$

$$+\varepsilon_0 \frac{\partial E_\rho}{\partial t} = \frac{1}{\rho} \left( \frac{\partial H_z}{\partial \theta} - \frac{\partial \rho H_\theta}{\partial z} \right) \quad (12.4)$$

On substitue  $H_\theta$  et  $E_\rho$  dans (12.3) et (12.4) par les deux équations issues de la statique (12.1) et (12.2) :

$$\frac{\mu_0}{2\pi\rho} \left( \frac{\partial I}{\partial t} + c^2 \frac{\partial Q}{\partial z} \right) = \frac{\partial E_z}{\partial \rho} \quad (12.5)$$

$$\frac{1}{2\pi} \left( \frac{\partial Q}{\partial t} + \frac{\partial I}{\partial z} \right) = \frac{\partial H_z}{\partial \theta} \quad (12.6)$$

$I$  est le courant circulant sur le fil,  $Q$  est la charge par unité de longueur et  $c$  la célérité.

L'équation (12.5) est intégrée suivant  $\rho$ , en sachant que pour  $\rho = a$  ( $a$  : rayon du fil),  $E_z(a) = 0$ . De plus, la dérivée partielle de  $H_z$  par rapport à  $\theta$  est nulle car cette composante est indépendante de  $\theta$ . Les équations (12.5) et (12.6) deviennent :

$$E_z(\rho) = L \left( \frac{\partial I}{\partial t} + c^2 \frac{\partial Q}{\partial z} \right) \quad (12.7)$$

$$0 = \left( \frac{\partial Q}{\partial t} + \frac{\partial I}{\partial z} \right) \quad (12.8)$$

L'inductance  $L$  est définie par :

$$L = \frac{\mu_0}{2\pi} \ln \left( \frac{r}{a} \right)$$

Ensuite, l'équation (12.7) est moyennée sur la surface d'une cellule  $\Delta x \Delta y$ , pour obtenir l'équivalence d'un champ moyen au sein de la cellule et éliminer de ce fait la dépendance en  $1/\rho$  de l'inductance  $L$  :

$$\langle E_z \rangle = L_{moy} \left( \frac{\partial I}{\partial t} + c^2 \frac{\partial Q}{\partial z} \right) \quad (12.9)$$

$$L_{moy} = \frac{\mu_0}{2\pi} \frac{\int \int_{\Delta x \Delta y, r > a} \ln(r/a) r \cos \theta dr}{\Delta x \Delta y}$$

L'inductance moyenne dans une maille FDTD est :

$$L_{moy} = \frac{\mu_0}{2\pi} \left[ \ln \left( \frac{\Delta x^2 + \Delta y^2}{4a^2} \right) + \frac{\Delta x}{\Delta y} \arctan \left( \frac{\Delta y}{\Delta x} \right) + \frac{\Delta y}{\Delta x} \arctan \left( \frac{\Delta x}{\Delta y} \right) + \frac{\pi a^2}{\Delta x + \Delta y} - 3 \right] \quad (12.10)$$

Cette dernière relation est celle utilisée par TRIDIMO dans le calcul de la self propre du fil.

Le passage dans l'espace discret au sens des différences centrées des équations (12.8) et (12.9) est direct. Les mises à jour de  $I$  au point  $(k + 1/2)$  et  $Q$  au point  $(k)$  se présentent comme suit :

$$I_{k+\frac{1}{2}}^{n+\frac{1}{2}} = I_{k+\frac{1}{2}}^{n-\frac{1}{2}} - \frac{c\Delta t}{\Delta z} (Q_{k+1}^n - Q_k^n) + \frac{\Delta t}{L_{moy}} \langle E_{z,k+\frac{1}{2}}^n \rangle \quad (12.11)$$

$$Q_k^{n+1} = Q_k^n - \frac{\Delta t}{\Delta z} \left( I_{k+\frac{1}{2}}^{n+\frac{1}{2}} - I_{k-\frac{1}{2}}^{n+\frac{1}{2}} \right) \quad (12.12)$$

La valeur moyenne de  $E_z$  est la valeur de  $E_z$  sur l'arête de la maille touchée par le fil.

Le schéma équivalent pour un fil est donné sur la figure 12.2 avec un générateur et une charge en série.

Un critère de stabilité est propre au fil et il peut être plus contraignant que le critère de stabilité du schéma FDTD. Son expression est la suivante pour un fil que l'on suposera orienté suivant (Oz) :

$$dt_{fil} \leq \frac{(\Delta z/v)}{\sqrt{1 + \frac{A(\Delta z/v)^2}{4}}} \text{ et } v = \frac{1}{\sqrt{\varepsilon_0 \varepsilon_r \mu_0}} \text{ la vitesse de propagation} \quad (12.13)$$

$$\text{avec } A = \frac{\mu_0 v^2}{L_{moy}} \left( \frac{1}{\Delta x \Delta y} + \frac{2}{\pi} \left( \frac{1}{\Delta x^2} + \frac{1}{\Delta y^2} \right) \right)$$

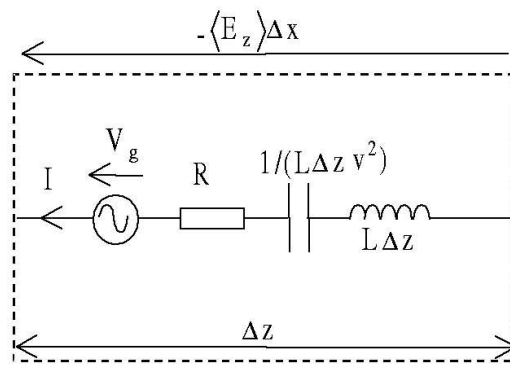


FIG. 12.2 – Schéma série équivalent d'un fil mince.

## Chapitre 13

# 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 pour 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.

### 13.1 Fichier de sortie, <fichier\_sortie>

Rôle, syntaxe et théorie -> VOIR LE GUIDE TEMSI

#### 13.1.1 Exemples

##### 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>
```

## 13.2 Intervalles et liste temps-fréquence, <temps\_frequence>

Rôle, syntaxe et théorie -> VOIR LE GUIDE TEMSI

### 13.2.1 Exemples

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>
```

### 13.3 Zone angulaire, <zone\_angulaire>

Rôle, syntaxe et théorie -> VOIR LE GUIDE TEMSI

#### 13.3.1 Exemples

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  $5^\circ$ 
# 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>
```

## 13.4 Formats de stockage en fréquence et normalisation en fréquence

### 13.4.1 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.

### 13.4.2 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 ??).

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)

## 13.5 Points d'observation en champ local, <resultat\_champ\_point>

### 13.5.1 Rôle - syntaxe

Ce bloc désigne des points d'observation au sein du volume de calcul sur lequel les composantes du champ e.m. sont stockées en temps ou en fréquence. Les possibilités offertes sont les suivantes :

- Choix des composantes du champ à stocker et position.
- Choix de l'intervalle ou de la liste en temps et en fréquence parmi ceux définis dans le bloc <temps\_frequence>.
- Différents formats de données en fréquence : réelle - imaginaire, module, module\_db, module-phase, module\_db-phase.

La construction du nom de fichier contenant les résultats et l'agencement des données dans les fichiers sont explicités au paragraphe §13.5.2.

**Syntaxe et signification** (identifiants de base)

**pt\$nom** \$C\_intervalle1 [\$C\_intervalle2] [ex] [ey] [ez] [hx] [hy] [hz] \$I\_i \$I\_j \$I\_k

-> Stockage du champ en un point d'observation.

intervalle1 et intervalle2 sont les noms d'intervalles ou listes en temps ou en fréquence déclarés dans le bloc <temps\_frequence>. Au maximum, deux intervalles de stockage peuvent être spécifiés après l'identifiant. Cependant, l'un devra être en temps et l'autre en fréquence.

[ex] [ey] [ez] [hx] [hy] [hz] : noms des composantes à stocker. Si aucune n'est spécifiée, alors les 6 composantes seront stockées. On ne perdra pas de vue que les composantes sont délocalisées au sein de la cellule (i,j,k) de la manière suivante :

$$e_x \left( i + \frac{1}{2}, j, k \right) ; e_y \left( i, j + \frac{1}{2}, k \right) ; e_z \left( i, j, k + \frac{1}{2} \right) \\ h_x \left( i, j + \frac{1}{2}, k + \frac{1}{2} \right) ; h_y \left( i + \frac{1}{2}, j, k + \frac{1}{2} \right) ; h_z \left( i + \frac{1}{2}, j + \frac{1}{2}, k \right)$$

i, j, k : coordonnées du points d'observation en nombre de cellules.

**pcpt\$nom** \$C\_intervalle1 [\$C\_intervalle2] [ex] [ey] [ez] [hx] [hy] [hz] \$I\_x \$I\_y \$I\_z  
\$C\_type\_observ

-> Stockage du champ en un point d'observation spécifié précisément par ses coordonnées par rapport à l'origine (0,0,0). Cette fois-ci, les composantes de champ sont réévaluées toutes au même endroit et non à leurs positions naturelles dans la cellule de Yee.

intervalle1 et intervalle2 sont les noms d'intervalles ou listes en temps ou en fréquence déclarés dans le bloc <temps\_frequence>. Au maximum, deux intervalles de stockage peuvent être spécifiés après l'identifiant. Cependant, l'un devra être en temps et l'autre en fréquence.

[ex] [ey] [ez] [hx] [hy] [hz] : noms des composantes à stocker. Si aucune n'est spécifiée, alors les 6 composantes seront stockées.

x, y, z : coordonnées du points d'observation en mètre par rapport à l'origine du volume de calcul (cf.§9.1.2).

type\_observ : correspond à l'un des mots clés suivants : cell, xinf, xsup, yinf, ysup, zinf, zsup.

Le choix du mot clé se fait selon les conditions suivantes :

- Si le point d'observation ne se trouve pas à l'interface entre deux milieux ou à l'interface avec une plaque métallique alors le mot clé est cell.

- Si le point d'observation se trouve à une interface, alors il faut indiquer le côté de l'interface associé au champ à récupérer (ou la normale à la face). Une interface se trouve nécessairement sur une des 6 faces de la cellule de Yee. Il suffit donc d'indiquer avec l'un des 6 mots clé **xinf**, **xsup**, **yinf**, **ysup**, **zinf**, **zsup** laquelle des faces convient.

Une remarque importante : Les milieux simple et les plaques parfaitement conductrices sont prises en compte dans le calcul. Cependant, les milieux dispersifs, à pertes ou les plaques minces de Béranger ne sont pas considérées.

**Syntaxe et signification** : Format des résultats en fréquence et Normalisation

Voir paragraphe §13.4.

-> Le format et la normalisation s'appliquent indépendamment l'un de l'autre à tous les points d'observation définis en dessous et jusqu'à la prochaine redéfinition du format ou de la normalisation. Par défaut, il n'y a pas de normalisation et le format en fréquence est partie réelle et partie imaginaire.

**Blocs requis** : <temps\_frequence>

**Ordre - Règle d'apparition**

**Exemple classique** :

```
<resultat_champ_point
# Par défaut, format en fréquence : parties réelle et imaginaire
# les 6 composantes
pt1 IT1 10 10 20
# Intervalles en temps et en fréquence
pt2 IT1 IF1 10 10 20
# Composante Ex seule, sortie sur une liste de fréquence
pt3 LF1 ex 10 10 20
# Composantes de H, sortie en temps et en fréquence
pt4 LF1 IT1 hx hy hz 10 10 20
resultat_champ_point>
```

**Exemple 2** : Changement de format :

```
<resultat_champ_point
# Changement de format : module et phase en degré
module_phase
pt1 IT1 IF1 ez 10 10 20
pt2 LF1 ez hx hy 10 10 20
# Changement de format : module seul en db
module_db
pt3 IT1 ez 10 10 20
pt4 IF1 ez hx hy 10 10 20
resultat_champ_point>
```

**exemple 3** : exemple complet avec points d'observation dont composantes colocalisés et normalisation

Une onde plane se propage à l'intérieur d'une surface de Huygens dépourvu d'obstacle.

```
<volume_calcul
```

```

    nxnynz    30 30 30
    dxdydz    0.3      0.3  0.3
    duree_totale    3e-7
volume_calcul>
<frontieres
    profil_pml_geometrique  10 1e-3  2.2
frontieres>
<fonction_source
    gaussienne  g1
        fmax    60e6
fonction_source>
<temps_frequence
    IT1 0 1 0
    IF1 1e4 20e6  50e3
    IL1 1e3 60e6  10 #intervalle log fréquence
temps_frequence>
<onde_plane
    dim_huygens  5 25 5 25 5 25
    injecteur g1 45 0 0 1.0
onde_plane>
<fichier_sortie
    extension dt1
fichier_sortie>
<resultat_champ_point
    #normalisation en fréquence pour tous les résultats en dessous
    normalisation_freq  g1 1.0
    module_phase    #pour tous les résultats en dessous
    pt1 IT1 IL1 ex ey ez hx hy hz  15 15 17
    pt2 IT1 IL1 ex ey ez hx hy hz  27 27 27
    # composante colocalisée sur le coin de la cellule (15,15,17)
    pcpt1 IT1 IF1 ex ey ez hx hy hz  4.5 4.2 4.8 cell
    # composante colocalisée sur le coin de la cellule (27,27,27)
    pcpt2 IT1 IF1 ex ey ez hx hy hz  7.8 7.8 7.8 cell
resultat_champ_point>

```

### 13.5.2 informations complémentaires

#### Format en temps des fichiers

Pour chaque point d'observation spécifié, un fichier résultat en temps est associé si un intervalle en temps ou une liste d'instants temporels est spécifié après l'identifiant du point d'observation. Le nom du fichier sera :

'pt\$nom\_ t.\$extension'  
'pcpt\$nom\_ t.\$extension'

Avec pt\$nom ou pcpt\$nom le nom du point d'observation selon la nature du point d'observation, \_ t indique que les résultats sont en temporel et \$extension le nom de l'extension (cf. §13.1).

colonne 1	colonne 2	colonne 3	colonne 3	...
temps (S)	Amplitude, composante n°1	Amplitude, composante n°2	Amplitude, composante n°3	...

TAB. 13.1 – Format des fichiers de sortie en temps

### Format en fréquence des fichiers

Pour chaque point d'observation spécifié, un fichier résultat en fréquence est associé si un intervalle en fréquence ou une liste de fréquences est spécifié après l'identifiant du point d'observation. Le nom du fichier sera :

`'pt$nom_f.$extension'`  
`'pcpt$nom_f.$extension'`

Avec `pt$nom` ou `pcpt$nom` le nom du point d'observation, `_f` indique que les résultats sont en fréquence et `$extension` le nom de l'extension (cf. §13.1).

colonne 1	colonne 2	colonne 3	...	colonne 2N	colonne 2N+1
fréquence (Hz)	$\Re(\text{compo n}^\circ 1)$	$\Im(\text{compo n}^\circ 1)$	...	$\Re(\text{compo n}^\circ N)$	$\Im(\text{compo n}^\circ N)$

TAB. 13.2 – Format des fichiers de sortie en fréquence, format de stockage : parties réelle et imaginaire

C'est la même chose pour les autres types de stockage :

- Si `module_phase` alors le module est à la place de la partie réelle et la phase à la place de la partie imaginaire.
- Si `module_db_phase` alors le module en dB est à la place de la partie réelle et la phase à la place de la partie imaginaire.
- Si `module_seul` alors le format est comme en temps avec le module à la place de l'amplitude et la fréquence à la place du temps.

## 13.6 Surface d'observation en champ local, <resultat\_champ\_surface>

### 13.6.1 Rôle - syntaxe

Ce bloc décrit des surfaces d'observation au sein du volume de calcul sur lesquels les composantes du champ e.m. sont stockées en temps ou en fréquence. Les possibilités offertes sont les suivantes :

- Choix du type de plan de la surface.
- Choix des composantes du champ à stocker.
- Choix de l'intervalle ou de la liste en temps et en fréquence parmi ceux définis dans le bloc <temps\_frequence>.
- Différents formats de données en fréquence : réelle - imaginaire, module, module\_db, module-phase, module\_db-phase.

La construction du nom de fichier contenant les résultats et l'agencement des données dans les fichiers sont explicités au paragraphe §13.6.2.

**Syntaxe et signification** (identifiants de base)

**surf\$nom** \$C\_intervalle1 [\$C\_intervalle2] [ex] [ey] [ez] [hx] [hy] [hz] \$I\_{\$i\_{min}} \$I\_{\$i\_{max}} \$I\_{\$j\_{min}} \$I\_{\$j\_{max}} \$I\_{\$k\_{min}} \$I\_{\$k\_{max}} \$I\_{\$i\_{pas}} \$I\_{\$j\_{pas}} \$I\_{\$k\_{pas}}

-> Stockage du champ sur une surface d'observation.

intervalle1 et intervalle2 sont les noms d'intervalles ou listes en temps ou en fréquence déclarés dans le bloc <temps\_frequence>. Au maximum, deux intervalles de stockage peuvent être spécifiés après l'identifiant. Cependant, l'un devra être en temps et l'autre en fréquence.

[ex] [ey] [ez] [hx] [hy] [hz] : noms des composantes à stocker. Si aucune n'est spécifiée, alors les 6 composantes seront stockées. On ne perdra pas de vue que les composantes sont délocalisées au sein de la cellule (i,j,k) de la manière suivante :

$$e_x \left( i + \frac{1}{2}, j, k \right) ; e_y \left( i, j + \frac{1}{2}, k \right) ; e_z \left( i, j, k + \frac{1}{2} \right) \\ h_x \left( i, j + \frac{1}{2}, k + \frac{1}{2} \right) ; h_y \left( i + \frac{1}{2}, j, k + \frac{1}{2} \right) ; h_z \left( i + \frac{1}{2}, j + \frac{1}{2}, k \right)$$

La surface est définie par deux points de coordonnées en nombre de cellules ( $i_{min}, j_{min}, k_{min}$ ) et ( $i_{max}, j_{max}, k_{max}$ ). La surface est le plan xOy si  $k_{min} = k_{max}$ , le plan yOz si  $i_{min} = i_{max}$  et le plan xOz si  $j_{min} = j_{max}$ . Les composantes de champ spécifiées sont stockées sur les intervalles spatiales :

$i_{min}$  à  $i_{max}$  par pas de  $i_{pas}$ .

$j_{min}$  à  $j_{max}$  par pas de  $j_{pas}$ .

$k_{min}$  à  $k_{max}$  par pas de  $k_{pas}$ .

**Syntaxe et signification** : Format des résultats en fréquence et Normalisation

Voir paragraphe §13.4.

-> Le format et la normalisation s'appliquent indépendamment l'un de l'autre à tous les points d'observation définis en dessous et jusqu'à la prochaine redéfinition du format ou de la normalisation. Par défaut, il n'y a pas de normalisation et le format en fréquence est partie réelle et partie imaginaire.

**Conseils** :

**Blocs requis** : <temps\_frequence>

**Ordre - Règle d'apparition****Exemple classique :**

```

<resultat_champ_surface
    # Par défaut, format en fréquence : parties réelle et imaginaire
    # les 6 composantes :
    surfx1 LT1  10 50  10  50 20 20    1 1 1
    # Intervalles en temps et en fréquence, les 6 composantes :
    surfx2 LT1 LF1  10 50  10  50 20 20  1 1 1
    # Composante ex seule, sortie sur une liste de fréquence,
    # pas de 2 cellules
    surfex LF1 ex 10 50  10  50 20 20  2 2 1
    # Composantes de H, sortie en temps et en fréquence,
    # pas de 2 cellules :
    surfhxyhz LT1 LF1 hx hy hz 10 50  10  50 20 20  2 2 1
resultat_champ_surface>

```

**Exemple 2 : Changement de format**

```

<resultat_champ_surface
    # Changement de format : module et phase en degré
    module_phase
    surfx1 LT1 LF1  10 50  10  50 20 20  1 1 1
    # Changement de format : module seul en db
    module_db
    surfx2 LT1 LF1  10 50  10  50 20 20  1 1 1
resultat_champ_surface>

```

**13.6.2 informations complémentaires****Format en temps des fichiers**

Pour chaque surface d'observation définie, un fichier résultat en temps est associé si un intervalle en temps ou une liste d'instants temporels est spécifié après l'identifiant de la surface d'observation. Le nom du fichier sera :

**'surf\$nom \_t.\$extension'**

Avec **surf\$nom** le nom de la surface d'observation, **\_t** indique que les résultats sont en temporel et **\$extension** le nom de l'extension (cf. §13.1).

Les temps ne sont pas indiqués, seule l'amplitude des composantes est écrite dans le fichier. Le fichier d'une surface d'observation contient les amplitudes des composantes du champ indiquées pour tous les temps et sur toute la surface de la manière suivante :

```

TEMPS N°1

COMPOSANTE N°1

    MATRICE de valeurs de la composante
    si plan x0y alors colonne --> x ; lignes --> y
    si plan y0z alors colonne --> y ; lignes --> z
    si plan x0z alors colonne --> x ; lignes --> z

```

```

COMPOSANTE N°2
    MATRICE de valeurs de la composante
    ...
TEMPS N°2
    COMPOSANTE N°1
        MATRICE de valeurs de la composante
    COMPOSANTE N°2
        MATRICE de valeurs de la composante
    ...
...
TEMPS N°N
    COMPOSANTE N°1
        MATRICE de valeurs de la composante
    COMPOSANTE N°2
        MATRICE de valeurs de la composante
    ...

```

### Format en fréquence des fichiers

Pour chaque surface d'observation indiquée, un fichier résultat en fréquence est associé si un intervalle en fréquence ou une liste de fréquences est spécifié après l'identifiant de la surface d'observation. Le nom du fichier sera :

**'surf\$nom\_f.\$extension'**

Avec **surf\$nom** le nom de la surface d'observation, **\_f** indique que les résultats sont en fréquence et **\$extension** le nom de l'extension (cf. §13.1). Le fichier d'une surface d'observation contient les amplitudes complexes des composantes du champ indiquées pour tous les temps et sur toute la surface de la manière suivante :

```

FREQUENCE N°1
    COMPOSANTE N°1
        MATRICE de valeurs de la composante
        si plan x0y alors colonne --> x ; lignes --> y
        si plan y0z alors colonne --> y ; lignes --> z
        si plan x0z alors colonne --> x ; lignes --> z
        La première moitié des colonnes correspond à la partie réelle ou
        le module ou le module en dB (selon le format) du champ. La
        seconde moitié des colonnes correspond à la partie imaginaire ou
        la phase en degré (selon le format) du champ.
    COMPOSANTE N°2
        MATRICE de valeurs de la composante
    ...
FREQUENCE N°2
    COMPOSANTE N°1
        MATRICE de valeurs de la composante
    COMPOSANTE N°2
        MATRICE de valeurs de la composante

```

```
...  
...  
FREQUENCE N°N  
  COMPOSANTE N°1  
    MATRICE de valeurs de la composante  
  COMPOSANTE N°2  
    MATRICE de valeurs de la composante  
...
```

## 13.7 Volume d'observation en champ local, <resultat\_champ\_volume>

### 13.7.1 Rôle - syntaxe

Contrairement à ce que laisse entendre le nom du bloc, celui-ci ne permet pas actuellement d'avoir des résultats sur les champs en volume. En fait, il offre seulement la possibilité de stocker la permittivité relative et la conductivité électrique sur un volume donné.

La construction du nom de fichier contenant les résultats et l'agencement des données dans les fichiers sont explicités au paragraphe §13.7.2.

**Syntaxe et signification** (identifiants de base)

**volepsr\$nom** [x] [y] [z] \$I\_{i\_{min}} \$I\_{i\_{max}} \$I\_{j\_{min}} \$I\_{j\_{max}} \$I\_{k\_{min}} \$I\_{k\_{max}} \$I\_{i\_{pas}}  
\$I\_{j\_{pas}} \$I\_{k\_{pas}}

**volsig\$nom** [x] [y] [z] \$I\_{i\_{min}} \$I\_{i\_{max}} \$I\_{j\_{min}} \$I\_{j\_{max}} \$I\_{k\_{min}} \$I\_{k\_{max}} \$I\_{i\_{pas}}  
\$I\_{j\_{pas}} \$I\_{k\_{pas}}

-> Stockage respectivement de la permittivité relative et de la conductivité électrique.

[x] [y] [z] : noms des composantes à stocker. Il faut au moins en spécifier une ! On ne perdra pas de vue que les composantes sont délocalisées au sein de la cellule (i,j,k) de la manière suivante :

$$\varepsilon_x \left( i + \frac{1}{2}, j, k \right) ; \varepsilon_y \left( i, j + \frac{1}{2}, k \right) ; \varepsilon_z \left( i, j, k + \frac{1}{2} \right)$$

$$\sigma_x \left( i + \frac{1}{2}, j, k \right) ; \sigma_y \left( i, j + \frac{1}{2}, k \right) ; \sigma_z \left( i, j, k + \frac{1}{2} \right)$$

Le volume de stockage est définie par les deux points extrêmes de coordonnées en nombre de cellules ( $i_{min}, j_{min}, k_{min}$ ) et ( $i_{max}, j_{max}, k_{max}$ ). Les composantes des deux paramètres  $\varepsilon$  et  $\sigma$  sont retenues sur les intervalles spatiales :

$i_{min}$  à  $i_{max}$  par pas de  $i_{pas}$ .

$j_{min}$  à  $j_{max}$  par pas de  $j_{pas}$ .

$k_{min}$  à  $k_{max}$  par pas de  $k_{pas}$ .

**Exemple classique :**

```
<resultat_champ_volume
volepsrx x y z 5 53 5 53 5 53 1 1 1 # pas de 1 dans chaque direction
volsigex x 5 53 5 53 5 53 2 2 2 # pas de 2 cellules dans chaque direction
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>
```

### 13.7.2 informations complémentaires

#### Format des fichiers

Pour chaque volume d'observation définie, un seul fichier résultat est associé. Le nom du fichier sera fonction du paramètre :

**'volepsr\$nom.\$extension'**

**'volsige\$nom.\$extension'**

Avec **volepsr\$nom** ou **volsige\$nom** les noms des volumes d'observation et **\$extension** le nom de l'extension (cf. §13.1).

Seule l'amplitude des composantes est écrite dans le fichier. La répartition des données dans le fichier se présente sous la forme suivante :

#### COMPOSANTE N°1

altitude k = kmin

MATRICE de valeurs de la composante :

si imin < imax alors colonne --> x ; lignes --> y

si imin = imax alors colonne --> y

altitude k = kmin + kpas

MATRICE de valeurs de la composante :

si imin < imax alors colonne --> x ; lignes --> y

si imin = imax alors colonne --> y

...

altitude k = kmax

#### COMPOSANTE N°2 si demandée

altitude k = 1

MATRICE de valeurs de la composante :

si imin < imax alors colonne --> x ; lignes --> y

si imin = imax alors colonne --> y

altitude k = 2

MATRICE de valeurs de la composante :

si imin < imax alors colonne --> x ; lignes --> y

si imin = imax alors colonne --> y

...

...

## 13.8 Tension - Courant - Impédance <resultat\_v\_i\_z>

### 13.8.1 Rôle - syntaxe

Ce bloc permet de calculer une tension, un courant et une impédance à partir des relations suivantes :

$$V = - \int_{p_1}^{p_2} \vec{E} \cdot d\vec{l} \quad (13.1)$$

$$I = \oint_c \vec{H} \cdot d\vec{l} \quad (13.2)$$

$$Z(f) = \frac{V(f)}{I(f)} \quad (13.3)$$

Voici les possibilités proposées par ce bloc :

- Choix de la circulation  $(p_1, p_2)$  pour le calcul de la tension. La circulation sera limitée à la direction x ou y ou z. Dans le cas d'un dipôle, un exemple est donné sur la figure 13.1.
- Choix du contour c pour le calcul du courant. Le plan du contour sera soit xOy, yOz ou xOz. Dans le cas d'un dipôle, un exemple est donné sur la figure 13.1.
- Choix de l'intervalle ou de la liste en temps et en fréquence parmi ceux définis dans le bloc <temps\_frequence>.
- Différents formats de données en fréquence : réelle - imaginaire, module, module\_db, module-phase, module\_db-phase.

La construction du nom de fichier contenant les résultats et l'agencement des données dans les fichiers sont explicités au paragraphe §13.8.2.

**Syntaxe et signification** (identifiants de base)

**V\$nom** \$C\_intervalle1 [\$C\_intervalle2] \$I\_{\$i\_{min}} \$I\_{\$i\_{max}} \$I\_{\$j\_{min}} \$I\_{\$j\_{max}} \$I\_{\$k\_{min}} \$I\_{\$k\_{max}}  
 -> Stockage d'une tension calculée à partir de la relation 13.1.  
 intervalle1 et intervalle2 sont les noms d'intervalles ou listes en temps ou en fréquence déclarés dans le bloc <temps\_frequence>. Au maximum, deux intervalles de stockage peuvent être spécifiés après l'identifiant. Cependant, l'un devra être en temps et l'autre en fréquence.

La circulation du champ électrique pour le calcul de la tension (13.1) est définie par les deux extrémas  $p_1$  et  $p_2$  de coordonnées en nombre de cellules  $(i_{min}, j_{min}, k_{min})$  et  $(i_{max}, j_{max}, k_{max})$ . La circulation est orientée suivant Ox si  $j_{min} = j_{max}$  et  $k_{min} = k_{max}$ , suivant Oy si  $i_{min} = i_{max}$  et  $k_{min} = k_{max}$  et suivant Oz si  $i_{min} = i_{max}$  et  $j_{min} = j_{max}$ .

**I\$nom** \$C\_intervalle1 [\$C\_intervalle2] \$I\_{\$i\_{min}} \$I\_{\$i\_{max}} \$I\_{\$j\_{min}} \$I\_{\$j\_{max}} \$I\_{\$k\_{min}} \$I\_{\$k\_{max}}  
 -> Stockage d'un courant calculé à partir de la relation 13.2.  
 intervalle1 et intervalle2 sont les noms d'intervalles ou listes en temps ou en fréquence déclarés dans le bloc <temps\_frequence>. Au maximum, deux intervalles de stockage peuvent être spécifiés après l'identifiant. Cependant, l'un devra être en temps et l'autre en fréquence.

Le contour d'intégration du champ magnétique pour le calcul du courant (13.2) est défini par les deux extrémas  $p_1$  et  $p_2$  de coordonnées en nombre de cellules  $(i_{min}, j_{min}, k_{min})$  et  $(i_{max}, j_{max}, k_{max})$ . Le contour est plan xOy si  $k_{min} = k_{max}$ , plan yOz si  $i_{min} = i_{max}$  et plan xOz si  $j_{min} = j_{max}$ .

**Z\$nom** \$C\_intervalle\_frequence

**I** \$I\_i\_min \$I\_i\_max \$I\_j\_min \$I\_j\_max \$I\_k\_min \$I\_k\_max

**V** \$I\_i\_min \$I\_i\_max \$I\_j\_min \$I\_j\_max \$I\_k\_min \$I\_k\_max

-> Stockage d'une impédance calculée à partir de la relation 13.3.

intervalle\_frequence est le nom de l'intervalle ou de la liste en fréquence déclaré dans le bloc <temps\_frequence>.

La circulation du champ électrique pour le calcul de la tension (13.1) est définie comme ci-dessus dans le stockage d'une tension (voir identifiant **V\$nom**). De même, le contour d'intégration du champ magnétique pour le calcul du courant (13.2) est défini comme ci-dessus dans le stockage d'un courant (voir identifiant **I\$nom**).

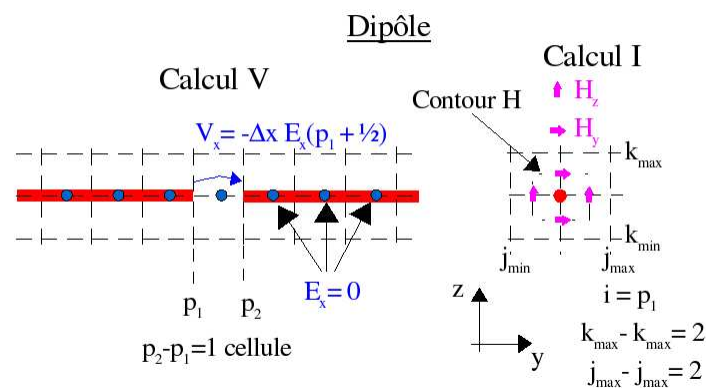


FIG. 13.1 – Exemple de calcul de la tension et du courant avec un dipôle

#### Syntaxe et signification (format des résultats en fréquence)

Voir paragraphe §13.4.

-> Les formats s'appliquent à toutes les tensions, courants et impédances définies en dessous et jusqu'à la prochaine redéfinition du format. Par défaut, le format en fréquence est partie réelle et partie imaginaire.

-> La normalisation s'appliquent à toutes les tensions et les courants définis en dessous et jusqu'à la prochaine redéfinition de la normalisation. Par défaut, il n'y a pas de normalisation.

**Blocs requis** : <temps\_frequence>

#### Ordre - Règle d'apparition

- Pour l'identifiant de résultats d'impédance **Z**, deux lignes supplémentaires sont obligatoires, l'une pour le calcul du courant et l'autre le calcul de la tension.

#### Exemple classique :

```
<resultat_v_i_z
# Par défaut, format en fréquence : parties réelle et imaginaire
# tension suivant z
Vz1 IT1 IF1 10 10 20 20 5 30
Vz2 IF1 10 15 20 20 30 30
# courant suivant z, plan du contour : x0y
```

```

Iz1 IT1 IF1 9      10  19  20  30  30
# Calcul impédance, tension et courant suivant z,
Zz1 LF1
      V  10      10  20  20      5  30      # Vz
      I  9       11  19  21      30  30      # Iz, contour plan xoy
resultat_v_i_z>

```

**Exemple** (changement de format) :

```

<resultat_v_i_z
# Changement de format : module et phase en degré
module_phase
Zz1 LF1
      V  10      10  20  20      5  30      # Vz
      I  9       11  19  21      30  30      # Iz, contour plan xoy

# Changement de format : module seul en db
module_db
Vz1 IT1 IF1 10  10  20  20      5  30
resultat_v_i_z>

```

### 13.8.2 informations complémentaires

#### Format en temps des fichiers

Pour chaque paramètre tension ou courant, un fichier résultat est associé en temps si un intervalle en temps ou une liste d'instants temporels est spécifié après l'identifiant de la tension ou du courant. Le nom du fichier sera respectivement pour la tension et le courant :

**'V\$nom\_t.\$extension'**  
**'I\$nom\_t.\$extension'**

Avec **V\$nom** et **I\$nom** les identifiants, **\_t** indique que les résultats sont en temporel et **\$extension** le nom de l'extension (cf. §13.1).

Les données sont rangées dans les fichiers comme indiqué pour la tension dans le tableau 13.3. C'est le même rangement pour le courant.

colonne 1	colonne 2	colonne 3	colonne 3	...
temps (S)	Amplitude, tension n°1	Amplitude, tension n°2	Amplitude, tension n°3	...

TAB. 13.3 – Format des fichiers de sortie en temps pour la tension

#### Format en fréquence des fichiers

Pour chaque paramètre tension, courant ou impédance, un fichier résultat en fréquence est associé si un intervalle ou une liste de fréquences est spécifié après l'identifiant. Le nom du fichier sera respectivement pour la tension, le courant et l'impédance :

**'V\$nom\_f.\$extension'**  
**'I\$nom\_f.\$extension'**  
**'Z\$nom\_f.\$extension'**

**\_f** indique que les résultats sont en fréquence et **\$extension** le nom de l'extension (cf. §13.1).

colonne 1	colonne 2	colonne 3	...	colonne 2N	colonne 2N+1
fréquence (Hz)	$\Re(\text{Param } n^{\circ}1)$	$\Im(\text{Param } n^{\circ}1)$	...	$\Re(\text{Param } n^{\circ}N)$	$\Im(\text{Param } n^{\circ}N)$

TAB. 13.4 – Format des fichiers de sortie en fréquence pour les paramètres tension, courant et impédance, format de stockage : parties réelle et imaginaire

Les données sont rangées dans les fichiers comme indiqué dans le tableau 13.4 (Param correspond à la tension, le courant ou l'impédance)

C'est la même chose pour les autres types de stockage :

- Si `module_phase` alors le module est à la place de la partie réelle et la phase à la place de la partie imaginaire.
- Si `module_db_phase` alors le module en dB est à la place de la partie réelle et la phase à la place de la partie imaginaire.
- Si `module_seul` alors le format est comme en temps avec le module à la place de l'amplitude et la fréquence à la place du temps

## 13.9 Résultat des structures filaires

### 13.9.1 Rôle - syntaxe

Ce bloc permet la sortie des résultats des paramètres tension, courant, impédance... sur les fils. Voici les possibilités proposées par ce bloc :

- Paramètres de sortie : tension, courant, impédance et charge sur n'importe quel segment des fils. Impédance d'entrée et tension d'alimentation au niveau du segment contenant un générateur.
- Choix de l'intervalle ou de la liste en temps et en fréquence parmi ceux définis dans le bloc <temps\_frequence>
- Différents formats de données en fréquence : réelle - imaginaire, module, module\_db, module-phase, module\_db-phase

La construction du nom de fichier contenant les résultats et l'agencement des données dans les fichiers sont explicités au paragraphe §13.9.2.

**Syntaxe et signification** (identifiants de base)

**I\$nom** \$C\_intervalle1 [\$C\_intervalle2] **F\$nomfil** \$I\_seg-debut [\$I\_seg-fin [\$I\_seg-pas]]  
**V\$nom** \$C\_intervalle1 [\$C\_intervalle2] **F\$nomfil** \$I\_seg-debut [\$I\_seg-fin [\$I\_seg-pas]]  
**Q\$nom** \$C\_intervalle1 [\$C\_intervalle2] **F\$nomfil** \$I\_seg-debut [\$I\_seg-fin [\$I\_seg-pas]]  
**Z\$nom** \$C\_intervalle\_frequence **F\$nomfil** \$I\_seg-debut [\$I\_seg-fin [\$I\_seg-pas]]

-> Stockage respectivement d'un courant I, d'une tension V, d'une charge Q, et d'une impédance Z sur les segments indiqués du fil de nom **F\$nomfil** (fil défini dans le bloc <structure\_fil> ou <structure\_filaire\_generalisee>). Les numéros de segment sont explicités avec les variables :

seg-debut : le n° de segment ( le n° du segment initial vaut 1, cf.§12) initial de stockage.

seg-fin : le n° de segment final de stockage. Cette valeur est optionnelle. Si elle est absente, alors le paramètre est stocké uniquement sur le segment seg-debut.

seg-pas : le pas entre les n° de segment à stocker. Cette valeur est optionnelle. Si elle est absente, alors le paramètre est stocké sur tous les segments entre seg-debut et seg-fin.

intervalle1 et intervalle2 sont les noms d'intervalles ou listes en temps ou en fréquence déclarés dans le bloc <temps\_frequence>. Au maximum, deux intervalles de stockage peuvent être spécifiés après l'identifiant. Cependant, l'un devra être en temps et l'autre en fréquence.

La tension d'un segment **V\$nom** est calculée à partir du champ électrique moyen au niveau du segment. L'impédance **Z\$nom** est le rapport entre la tension du segment et le courant circulant sur le même segment du fil. Elle inclut donc les caractéristiques électriques du fil sur un segment (générateur et charge inclus si présent). La charge représente la capacité du segment du fil relativement à la maille qui l'entoure.

A noter que le courant calculé se trouve au milieu du segment alors que la charge est positionnée à l'extrémité initiale du segment soit sur le noeud du segment (cf.§12).

**VG\$nom** \$C\_intervalle1 [\$C\_intervalle2] **GV\$nomgénérateur**  
**VG\$nom** \$C\_intervalle1 [\$C\_intervalle2] **GI\$nomgénérateur**  
**ZE\$nom** \$C\_intervalle\_frequence **GV\$nomgénérateur**  
**ZE\$nom** \$C\_intervalle\_frequence **GI\$nomgénérateur**

-> Tension du générateur et impédance d'entrée. Ces paramètres ne peuvent être calculés que sur le segment du fil où se trouve un générateur de tension **GV\$nomgénérateur** ou un générateur de courant **GI\$nomgénérateur**.

intervalle1, intervalle2 et intervalle\_frequence ont les mêmes significations que dans le paragraphe ci-dessus.

L'impédance d'entrée est calculée par la relation :

$$ZE(f) = \frac{VG(f) - R_g I(f)}{I(f)}$$

Avec  $R_g$  la résistance interne du générateur

**Syntaxe et signification** (format des résultats en fréquence)

Voir paragraphe §13.4.

-> Les formats s'appliquent à toutes les tensions, courants, impédances et charges définis en dessous et jusqu'à la prochaine redéfinition du format. Par défaut, le format en fréquence est partie réelle et partie imaginaire.

**Blocs requis** : <temps\_frequence>

**Ordre - Règle d'apparition**

**Exemple classique** :

```
<resultat_structure_fil

# Courants en temps et en fréquence sur le fil de nom Fil1
I1 IT1 IF1 Fil1 3          # segment n°3 seulement
I2 IT1 IF1 Fil1 2 5        # tous les segments entre 2 et 5
I3 IT1 IF1 Fil1 1 20 2     # segment entre 1 et 20 par pas de 2
# Tensions de segment en temps et en fréquence sur le fil de nom Fil1
V1 IT1 IF1 Fil1 3          # segment n°3 seulement
V2 IT1 IF1 Fil1 2 5        # tous les segments entre 2 et 5
# Tension d'un générateur de tension
VG1 IT1 IF1 GV1           # GV1 : nom du générateur
# Impédance du segment n°3 du fil de nom Fil1
Z1 IF1 Fil1 3             # segment n°3
# Impédance d'entrée au niveau du générateur
ZE1 IF1 GV1 # GV1 : nom du générateur
# Charges en temps sur le fil de nom Fil1
Q1 IT1 IF1 Fil1 2 5       # tous les segments entre 2 et 5

resultat_structure_fil>
```

**Exemple 2** (changement de format) :

```
<resultat_structure_fil

# Format en fréquence : module-phase
module_phase
I1 IT1 IF1 Fil1 3          # segment n°3 seulement
V1 IT1 IF1 Fil1 3          # segment n°3 seulement
# Format en fréquence : reel-imaginaire
reelle_imaginaire
ZE1 IF1 GV1

resultat_structure_fil>
```

Des exemples sont donnés aussi au paragraphe §12.1.

### 13.9.2 informations complémentaires

#### Format en temps des fichiers

Pour chaque paramètre tension, courant ou charge, un fichier résultat en temps est associé si un intervalle en temps ou une liste d'instants temporels est spécifié après l'identifiant du paramètre. Le nom du fichier sera respectivement pour la tension, la tension de générateur, le courant et la charge :

'V\$nom\_t.\$extension'  
 'VG\$nom\_t.\$extension'  
 'I\$nom\_t.\$extension'  
 'Q\$nom\_t.\$extension'

Avec V\$nom, VG\$nom, I\$nom et Q\$nom les identifiants, \_t indique que les résultats sont en temporel et \$extension le nom de l'extension (cf. §13.1).

Les données sont rangées dans les fichiers comme indiqué pour la tension dans le tableau 13.5. C'est le même rangement pour les autres paramètres.

colonne 1	colonne 2	colonne 3	colonne 3	...
temps (S)	Amplitude, tension n°1	Amplitude, tension n°2	Amplitude, tension n°3	...

TAB. 13.5 – Format des fichiers de sortie en temps pour la tension

#### Format en fréquence des fichiers

Pour chaque paramètre tension, courant, charge ou impédance, un fichier résultat en fréquence est associé si un intervalle en fréquence ou une liste de fréquences est spécifié après l'identifiant du paramètre. Le nom du fichier sera respectivement pour la tension, la tension du générateur, le courant, la charge, l'impédance, l'impédance d'entrée :

'V\$nom\_f.\$extension'  
 'VG\$nom\_f.\$extension'  
 'I\$nom\_f.\$extension'  
 'Q\$nom\_f.\$extension'  
 'Z\$nom\_f.\$extension'  
 'ZE\$nom\_f.\$extension'

\_f indique que les résultats sont en fréquence et \$extension le nom de l'extension (cf. §13.1).

Les données sont rangées dans les fichiers comme indiqué dans le tableau 13.6 (Param correspond à la tension, le courant ou l'impédance)

colonne 1	colonne 2	colonne 3	...	colonne 2N	colonne 2N+1
fréquence (Hz)	$\Re(\text{Param } n^{\circ}1)$	$\Im(\text{Param } n^{\circ}1)$	...	$\Re(\text{Param } n^{\circ}N)$	$\Im(\text{Param } n^{\circ}N)$

TAB. 13.6 – Format des fichiers de sortie en fréquence pour les paramètres identifiants V, I, VG, Q, Z, ZE, VZP, ZP, VQ, VIQ. Format de stockage : parties réelle et imaginaire

C'est la même chose pour les autres types de stockage :

- Si module\_phase alors le module est à la place de la partie réelle et la phase à la place de la partie imaginaire.
- Si module\_db\_phase alors le module en dB est à la place de la partie réelle et la phase à la place de la partie imaginaire.

- Si `module_seul` alors le format est comme en temps avec le module à la place de l'amplitude et la fréquence à la place du temps

## 13.10 Résultat champ lointain en fréquence, <champ\_lointain\_frequence>

### 13.10.1 Rôle - syntaxe

Le champ lointain peut être évalué par deux approches fréquentielles (voir §13.10.2), l'une basée sur le rayonnement de courants d'une surface de Huygens et l'autre, aux applications plus limitées, basée sur le rayonnement des courants circulants sur des conducteurs surfaciques ou filaire toujours dans le plan xoy (voir §13.10.2). Nous ne proposons pas le calcul direct du champ lointain en temporel. Toutefois, il est toujours possible de faire une transformée de Fourier inverse si vous avez suffisamment de points de fréquences et qu'en outre, si tout le spectre est décrit.

Avec la méthode basée sur le principe de Huygens, le bloc <champ\_lointain> est dépendant de trois autres blocs : <temps\_frequence>, <zone\_angulaire> et <surface\_huygens>. Les possibilités offertes sont :

- Résultat du champ lointain en coordonnées sphériques normalisées :  $E_\theta$  et  $E_\phi$
- Directivité en coordonnées sphériques :  $D_\theta$  et  $D_\phi$ .
- Puissance rayonnée  $P_r$  à partir du vecteur de Poynting intégré sur la surface de Huygens.
- Résultats pour le 2D ou le 3D.
- Principe des images appliqué dans le cas d'un plan de masse infini -> rayonnement dans une demi sphère.
- Plusieurs calculs de champ lointain simultanément.
- Multiples zones de rayonnement (sur des plans 2D ou des zones 3D).
- Choix du centre de phase qui est la référence de phase pour le champ lointain.

Avec la méthode basée sur le rayonnement des courants circulant sur des conducteurs surfaciques ou filaires situés dans des plans xoy, le bloc <champ\_lointain> est dépendant des blocs : <temps\_frequence>, <zone\_angulaire> et <structure> ou <structure\_fil>. Cette méthode permet de tenir compte rigoureusement d'une interface entre deux milieux semi-infinis. Ce qui n'est pas le cas avec la méthode basée sur le principe de Huygens car la surface de huygens doit se trouver dans un milieu homogène. Les possibilités offertes par la seconde méthode sont :

- Les mêmes résultats que pour la première méthode :  $E_\theta$ ,  $E_\phi$ ,  $D_\theta$ ,  $D_\phi$  et  $P_r$
- Résultat uniquement pour un espace 3D.
- Des milieux semi-infinis peuvent être présents (application pour le rayonnement air -sol).
- Plusieurs calculs de champ lointain simultanément.
- Multiples zones de rayonnement (sur des plans 2D ou des zones 3D).
- Choix du centre de phase.

La seconde méthode ne prend pas en compte la présence d'un plan de masse infini. Elle a été développée pour calculer le rayonnement de structures en présence de deux milieux semi-infinis (air+sol). L'interface entre les deux milieux semi-infinis est obligatoirement plan xoy. Les structures rayonnantes sont obligatoirement des conducteurs parfaits surfaciques plan xoy ou des fils orientés suivant x ou y. La présence de substrats ou de structures diélectriques est interdite.

### Syntaxe et signification

Plusieurs calculs de champ lointain peuvent être fait simultanément (donc avec des surfaces de Huygens différentes ou des objets constitués de conducteurs parfaits). Dès lors, la démarche est de déclarer en premier lieu un champ lointain avec sa surface de Huygens ou l'objet à rayonné et sa bande de fréquences. Ensuite, en dessous, les différents paramètres de sortie sont indiqués :

**CHL\$nom SURF\$nom \$C\_intervalle\_frequence**

-> Déclaration d'un champ lointain avec l'identifiant **CHL**. **SURF\$nom** est la surface de Huygens déclarée dans le bloc <surface\_huygens>. **intervalle\_frequence** (**IF\$nom** ou **LF\$nom**) est un intervalle ou une liste de fréquences déclaré dans le bloc <temps\_frequence> sur lequel est calculé le champ lointain. Dans le cas où la surface de Huygens est tronquée, il faut s'assurer que les champs sur les bords de la troncature soient très faibles pour avoir des résultats correctes en champ lointain.

**CHL\$nom OBJET\$nom [OBJET\_FIL\$nom] \$C\_intervalle\_frequence**

ou

**CHL\$nom OBJET\_FIL\$nom [OBJET\$nom] \$C\_intervalle\_frequence**

-> Déclaration d'un champ lointain avec l'identifiant **CHL**. **OBJET\$nom**, et **OBJET\_FIL\$nom** sont les noms d'objets contenant respectivement des conducteurs parfaits surfacique plan xOy définis dans le bloc structure (§10.3) et des fils orientés suivant x ou y (§12.1). **\$C\_intervalle\_frequence** (**IF\$nom** ou **LF\$nom**) est un intervalle ou une liste de fréquences déclaré dans le bloc <temps\_frequence> sur lequel est calculé le champ lointain. Cette approche fait appel à la seconde méthode de calcul du champ lointain. Tous les objets doivent être situés dans le même demi-espace ou sur l'interface !

**interface xoy \$I\_position**

-> Cet identifiant concerne uniquement la seconde méthode de calcul du champ lointain et en outre, il doit obligatoirement être défini avec cette seconde méthode. Il s'agit du positionnement de l'interface entre les deux milieux semi-infinis. Cette interface est plan xoy. La position suivant Oz doit être définie en nombre de cellules relativement à l'origine du repère du volume de calcul (§9.1). Si le volume de calcul ne contient pas deux milieux semi-infini mais un milieu homogène, alors une interface doit être définie et elle sera positionnée à l'altitude à laquelle vous voulez votre centre de phase.

Ensuite, en dessous, les paramètres de sortie sont définis :

**ETH\$nom EPH\$nom DTH\$nom DPH\$nom PR\$nom ITH\$nom**

ou

**ETP\$nom DTP\$nom ITH\$nom**

ou

**PR\$nom**

-> **ETH\$nom** est la composante du champ électrique  $E_\theta$ , **EPH\$nom** la composante du champ électrique  $E_\phi$ , **DTH\$nom** et **DPH\$nom** les composantes de la directivité  $D_\theta$  et  $D_\phi$ . **PR\$nom** est la puissance rayonnée par les surfaces de Huygens. Pour les paramètres  $E_\theta$ ,  $E_\phi$ ,  $D_\theta$  et  $D_\phi$ , il est indispensable d'indiquer la zone angulaire **ITH\$nom** en fin de la ligne (elle est déclarée dans le bloc <zone\_angulaire>). Ce n'est pas le cas pour la puissance rayonnée car elle est calculée directement à partir des courants circulant sur la surface de Huygens (cf. §13.10.2). Si la méthode de calcul est la n°2 (rayonnement d'objets conducteurs), une surface de Huygens est automatiquement créée par TRIDIMO pour faire le calcul de la puissance rayonnée. Cette surface fermée entoure tous les objets conducteurs et traverse l'interface air-sol sur une profondeur de deux cellules. Elle est positionnée au plus près à deux cellules des objets.

**image \$C\_type-plan [\$I\_position]**

-> Application du principe des images, rayonnement dans une demi-sphère. Le principe des images s'applique uniquement avec l'approche basée sur le principe des surfaces de Huygens. La demi-sphère de rayonnement (<zone\_angulaire>) doit être définie en cohérence avec la définition des surfaces de Huygens.

type-plan : désigne le type de plan du plan de masse. Les valeurs de type-plan sont : **xoy** ou **yozy** ou **xoz**.

position : coordonnée du plan de masse suivant sa normale en nombre de cellule.

Si un plan de masse infini (plan conducteur) est présent, le principe des images doit être appliqué lors du calcul du champ lointain. Deux approches sont possibles. Si la distance entre la surface de Huygens et le plan de masse est très inférieur à la longueur d'onde alors le principe des images est simplifié et dans ce cas il ne faut pas indiquer la position du plan de masse (\$I\\_position). Dans le cas contraire, la position du plan de masse doit impérativement être indiquée en nombre de cellules (repère du volume de calcul).

**centre\_phase**    \$R\\_i\$ \$R\\_j\$ \$R\\_k\$

-> Définition d'un centre de phase pour le calcul du champ lointain. Les coordonnées (i,j,k) sont exprimées en nombre de cellules relativement à l'origine du repère définie dans le bloc <volume\_calcul> (§9.1) mais les valeurs peuvent être non-entières. Par défaut et dans le cas de la méthode de la surface de Huygens, le centre de phase se trouve au milieu de la surface de Huygens. Dans le cas de la seconde méthode de calcul, le centre de phase est au milieu de la structure rayonnante dans le plan xoy et à la position de l'interface suivant Oz entre les deux milieux semi-infinis. Il est à noter que la position du centre de phase, suivant Oz et avec la seconde méthode, est imposé par la position de l'interface. Ce qui veut dire que la valeur de k n'est pas considérée.

#### Syntaxe et signification (format des résultats en fréquence)

Voir paragraphe §13.4.

-> Les formats s'appliquent à tous les paramètres de sortie définis en dessous et jusqu'à la prochaine redéfinition du format. Par défaut, le format en fréquence est module - phase en degré sauf pour la puissance rayonnée où le format est toujours en partie réelle et partie imaginaire. Autre exception pour la directivité qui s'exprime en puissance : si le format est réelle\_imaginaire, module\_phase ou module seul alors le format de la directivité est le module, si le format est module\_db\_phase ou module\_db alors le format de la directivité est en dBw.

#### Conseils - Remarque :

- Attention, une boîte de Huygens doit être plongée dans un milieu homogène, sans pertes et non dispersif. En outre, la surface de Huygens doit se trouver à une distance d'une cellule au moins d'une interface (ca doit marcher à l'interface en fait mais ca n'a pas été validé!).
- La transformée champ proche - champ lointain est appliquée dans un milieu  $\varepsilon, \mu$  dont les valeurs sont prises automatiquement au point minimal ( $i_{min}, j_{min}, k_{min}$ ) de la boîte de Huygens.
- Le centre de phase est fourni par la surface de Huygens définie dans le bloc <surface\_huygens>. Par défaut, il correspond au centre de la surface de Huygens. Cependant, il peut être redéfini en donnant une nouvelle origine associé à la surface de Huygens dans le bloc <surface\_huygens> (cf.9.3) ou dans le bloc <champ\_lointain\_frequence> en définissant un centre de phase.

**Blocs requis** : <temps\_frequence>, <zone\_angulaire> et <surface\_huygens>

#### Ordre - Règle d'apparition

#### Exemple classique :

Les blocs <temps\_frequence>, <zone\_angulaire> et <surface\_huygens> sont décrits avant le bloc <champ\_lointain\_frequence>. Cet exemple montre quelques combinaisons de calcul du champ lointain avec les différents paramètres de sortie. Deux calculs de champ lointain sont définis pour deux bandes de fréquences différentes.

<temps\_frequence

```

IFbande1 0 10e9 0.05e9
LFechantillons1 1e9 2e9 3e9 4e9
ITintervalle1 0 10e-9 0
LTinstants1 1e-9 2e-9 3e-9
ITintervalle_complet

temps_frequence>
<zone_angulaire

# Intervalle plan  $\theta$  : (0 : 180 : 2.5),  $\phi = 0^\circ$  et  $90^\circ$ 
ITH_1 0.0 180.0 2.5 0.0 90.0
# Intervalle plan  $\phi$  : (0 : 180 : 5),  $\theta = 0^\circ$  et  $90^\circ$ 
IPH_1 0.0 180.0 5.0 0.0 90.0

zone_angulaire>
<surface_huygens

# 6 faces de présentes par défaut
SURF1 10 80 10 80 5 20

surface_huygens>
<champ_lointain_frequence

# Surface de Huygens : SURF_1
# Bande de fréquence : IFbande1
CHL_1 SURF_1 IF_1

# Paramètres de sortie :  $E_\theta, E_\phi, D_\theta, D_\phi$  et  $P_r$  sur la zone angulaire : ITH_1
ETH1 EPH1 DPH1 DTH1 PR1 ITH_1
# Même paramètres de sortie avec une écriture plus concise
# et sur la zone angulaire : IPH_1
ETP1 DTP1 PR1 IPH_1

# Nouveau champ lointain
# Changement de la bande de fréquence : LFechantillons1
CHL_2 SURF_1 LFechantillons1

# Si on veut la puissance rayonnée seule :
PR1
# Si on veut que la directivité avec le module seul en dB :
DTP1 ITH_1 # dans le plan theta
DTP1 IPH_1 # dans le plan phi

champ_lointain_frequence>

```

**Exemple 2 :** avec un plan de masse infini

**Exemple 3 :** seconde méthode, interface entre deux milieux semi-infinis, dipole filaire

```

<volume_calcul

nxnynz 70 30 15
dxdydz 1e-2 1e-2 1e-2
duree_totale 4e-8

volume_de_calcul>
<frontieres

```

```

    profil_pml_geometrique 8 1e-3 3.0
frontieres>
<fonction_source
    derivee_gaussienne sg1
        fmax 1e9
fonction_source>
<milieu_non_dispersif
    milieu sol
    epsr 3.0
milieu_non_dispersif>
<structure
    sol 1 81 1 71 1 10
structure>
<structure_fil #
    F1 15 64 35 35 10 10 1e-4
    GV1 F1 25 sg1 1.0 100
    OBJET_FIL1 F1
structure_fil>
<temps_frequence
    IT1
    IF1 0 300e6 1e6
    LF1 135e6 150e6 183e6 220e6 300e6
temps_frequence>
<zone_angulaire
    ITH1 -90 270 1 0 90
zone_angulaire>
<resultat_champ_point
    pt1Ex IT1 IF1 ex 10 5 10
    pt2Ex IT1 IF1 ex 39 15 10
resultat_champ_point>
<champ_lointain_frequence
    module_seul
    CHL1 OBJET_FIL1 LF1
    ETP DTP PR ITH1
    interface xoy 10
champ_lointain_frequence>

```

**Exemple 4 :** seconde méthode, interface entre deux milieux semi-infinis, antenne papillon

```

<volume_de_calcul
    nxnynz 70 70 20
    dxdydz 1e-2 1e-2 1e-2
    duree_totale 4e-8

```

```

volume_de_calcul>
<frontieres
    profil_pml_geometrique 8 1e-3 3.0
frontieres>
<fonction_source
    derivee_gaussienne sg1
        fmax 1e9
fonction_source>
<milieu_non_dispersif
    milieu sol
    epsr 3.0
milieu_non_dispersif>
<structure
    OBJET1 metal
        ptminmax 40 42 34 36 10 10
        ptminmax 42 44 33 37 10 10
        ptminmax 44 46 32 38 10 10
        ptminmax 46 48 31 39 10 10
        ptminmax 48 50 30 40 10 10
        ptminmax 50 52 29 41 10 10
        ptminmax 52 54 28 42 10 10
        ptminmax 54 56 27 43 10 10
        ptminmax 56 58 26 44 10 10
        ptminmax 58 60 25 45 10 10
        ptminmax 60 62 24 46 10 10
        ptminmax 62 64 23 47 10 10
        ptminmax 37 39 34 36 10 10
        ptminmax 35 37 33 37 10 10
        ptminmax 33 35 32 38 10 10
        ptminmax 31 33 31 39 10 10
        ptminmax 29 31 30 40 10 10
        ptminmax 27 29 29 41 10 10
        ptminmax 25 27 28 42 10 10
        ptminmax 23 25 27 43 10 10
        ptminmax 21 23 26 44 10 10
        ptminmax 19 21 25 45 10 10
        ptminmax 17 19 24 46 10 10
        ptminmax 15 17 23 47 10 10
        sol 1 71 1 71 1 10
structure>
<structure_fil # alimentation
    F1 39 40 35 35 10 10 1e-4
        GV1 F1 1 sg1 1.0 100
    JFP1 deb F1
    JFP1 fin F1
    OBJET_FIL1 F1 # pour le champ lointain

```

```

structure_fil>
<temps_frequence
    LF1 135e6 150e6 183e6 220e6
temps_frequence>
<zone_angulaire
    ITH1 -90 270 1 0 90
zone_angulaire>
<champ_lointain_frequence
    module_seul
    CHL3 OBJET1 OBJET_FIL1 LF1    #fil + antenne papillon
        ETP DTP PR ITH1    # les résultats
        interface xoy 10 #interface air-sol
champ_lointain_frequence>

```

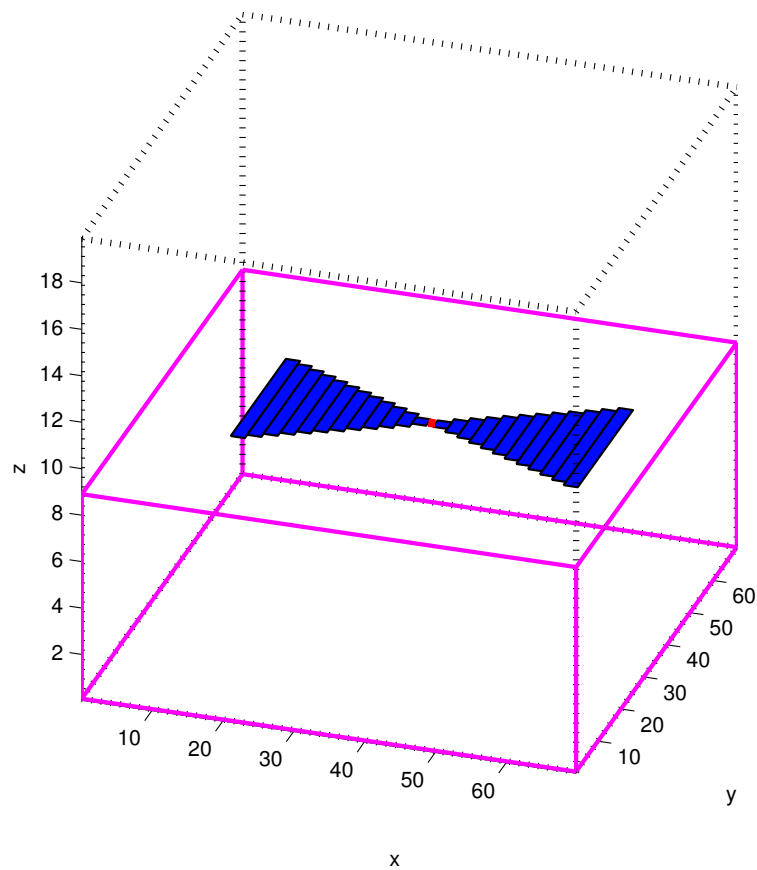


FIG. 13.2 – Antenne papillon alimenté par un générateur de tension sur un fil

### 13.10.2 informations complémentaires

#### Format des fichiers de sortie

Les données des fichiers de sortie sont tous du domaine des fréquences.

#### Le champ lointain

Les champs lointains  $E_\theta$  et  $E_\phi$  sont stockés respectivement dans des fichiers de nom :

'CHL\$nom\_ETH\$nom1\_NomZone.\$extension'

'CHL\$nom\_EPH\$nom1\_NomZone.\$extension'

**CHL\$nom** est le nom du champ lointain, ensuite suit le nom de la composante du champ lointain, **NomZone** est le nom de l'identifiant de la zone angulaire et **\$extension** le nom de l'extension (cf. §13.1).

Les données sont rangées dans les fichiers comme indiqué dans le tableau 13.7.

colonne 1	colonne 2	colonne 3	colonne 4	...	colonne 2N+1	colonne 2N+2
$\theta$ en degré	$\phi$ en degré	$\Re(E)$ , freq. n°1	$\Im(E)$ , freq. n°1	...	$\Re(E)$ , freq. n°N	$\Im(E)$ , freq. n°N

TAB. 13.7 – Format des fichiers de sortie en fréquence pour les paramètres  $E_\theta$  et  $E_\phi$ . Format de stockage : parties réelle et imaginaire. Par défaut, le format de stockage est module - phase.

C'est la même chose pour les autres format de stockage :

- Si **module\_phase** alors le module est à la place de la partie réelle et la phase à la place de la partie imaginaire.
- Si **module\_db\_phase** alors le module en dB est à la place de la partie réelle et la phase à la place de la partie imaginaire.
- Si **module\_seul** alors le module est à la place de la partie réelle.

#### La directivité

Les directivités  $D_\theta$  et  $D_\phi$  sont stockées respectivement dans des fichiers de nom :

'CHL\$nom\_DTH\$nom1\_NomZone.\$extension'

'CHL\$nom\_DPH\$nom1\_NomZone.\$extension'

**CHL\$nom** est le nom du champ lointain, ensuite suit le nom de la composante de la directivité, **NomZone** est le nom de l'identifiant de la zone angulaire et **\$extension** le nom de l'extension (cf. §13.1).

Les données sont rangées dans les fichiers comme indiqué dans le tableau 13.8 pour les formats module ou dBw.

colonne 1	colonne 2	colonne 3	colonne 4	...	colonne N+1	colonne N+2
$\theta$ en degré	$\phi$ en degré	D, freq. n°1	D, freq. n°2	...	D, freq. n°N-1	D, freq. n°N

TAB. 13.8 – Format des fichiers de sortie en fréquence pour les paramètres  $D_\theta$  et  $D_\phi$

#### La puissance

La puissance rayonnée  $P_r$  est stockées dans le fichier de nom :

'CHL\$nom\_PR\$nom1.\$extension'

**CHL\$nom** est le nom du champ lointain, ensuite suit le nom de l'identifiant de la puissance rayonnée et **\$extension** le nom de l'extension (cf. §13.1).

Les données sont rangées dans le fichier comme indiqué dans le tableau 13.9

colonne 1	colonne 2	colonne 3
fréquence (Hz)	$\Re(P_r)$	$\Im(P_r)$

TAB. 13.9 – Format du fichier de sortie en fréquence pour le paramètre  $P_r$ . Format de stockage : parties réelle et imaginaire

#### Théorie sur le calcul du champ lointain

Le calcul des potentiels vecteurs retardés à partir de l'intégration des sources de courant circulant sur une surface de Huygens est à l'origine de la transformée champ proche - champ lointain. Le champ lointain dérive des potentiels retardés. Quant aux sources de courant sur la surface de Huygens, elles sont déduites à partir du champ sur la surface de Huygens provenant des sources à l'intérieur de celle-ci (voir figure 13.3).

Traduit en équation dans le domaine fréquentiel et en espace libre (milieu :  $\varepsilon_0, \mu_0$ ), on a :

- les relations des sources de courant en fonction des champs :

$$\begin{aligned}\vec{J}_s(\vec{r}', f) &= \vec{n} \wedge \vec{H}(\vec{r}', f) \\ \vec{M}_s(\vec{r}', f) &= -\vec{n} \wedge \vec{E}(\vec{r}', f)\end{aligned}$$

- les relations entre les potentiels vecteurs retardés et les sources de courant :

$$\vec{A}(\vec{R}, f) = \frac{\mu_0}{4\pi} \oint_{S_{huyg}} \vec{J}_s(\vec{r}', f) \frac{e^{-j\vec{k} \cdot \vec{R}}}{R} dS \quad (13.4)$$

$$\vec{F}(\vec{R}, f) = \frac{\varepsilon_0}{4\pi} \oint_{S_{huyg}} \vec{M}_s(\vec{r}', f) \frac{e^{-j\vec{k} \cdot \vec{R}}}{R} dS \quad (13.5)$$

On se place dans l'hypothèse où le champ calculé est à grande distance ( $r \gg r'$ ), dans ce cas :  $R \equiv r$ . Dans cet condition, les relations 13.4 et 13.5 deviennent :

$$\begin{aligned}\vec{A}(\vec{R}, f) &= \frac{\mu_0}{4\pi} \frac{e^{-jkr}}{r} \vec{N}(\psi, f) \\ \vec{F}(\vec{R}, f) &= \frac{\varepsilon_0}{4\pi} \frac{e^{-jkr}}{r} \vec{L}(\psi, f)\end{aligned}$$

où les vecteurs dits « de phase »  $\vec{N}$  et  $\vec{L}$  sont définis par :

$$\begin{aligned}\vec{N}(\psi, f) &= \oint_{S_{huyg}} \vec{J}_s(\vec{r}', f) e^{-jkr' \cos(\psi)} dS \\ \vec{L}(\psi, f) &= \oint_{S_{huyg}} \vec{M}_s(\vec{r}', f) e^{-jkr' \cos(\psi)} dS\end{aligned}$$

- les relations en coordonnées sphériques entre le champ lointain et les potentiels vecteurs retardés, supposant nuls les termes décroissant en  $1/r^2$  ainsi que les composantes radiales des champ  $\vec{E}$  et  $\vec{H}$  :

$$\begin{aligned}E_\theta &= -j\omega (A_\theta + \eta_0 F_\phi) = -j\frac{\omega}{c} \frac{e^{-jkr}}{4\pi r} (\eta_0 N_\theta + L_\phi) \\ E_\phi &= -j\omega (A_\phi - \eta_0 F_\theta) = -j\frac{\omega}{c} \frac{e^{-jkr}}{4\pi r} (\eta_0 N_\phi - L_\theta)\end{aligned}$$

avec  $\eta_0 = \varepsilon_0/\mu_0$ , l'impédance du vide.

Les composantes en coordonnées sphériques des vecteurs de phase sont exprimées en fonction des sources de courant calculées en coordonnées cartésiennes.

## Paramètres de sortie

### les champs $E_\theta$ et $E_\phi$

Les valeurs des champs complexes  $E_\theta$  et  $E_\phi$  en sortie de TRIDIMO sont calculées avec la formulation de champ lointain pour une distance de un mètre (avec toutefois une erreur sur la phase de  $(\omega/c)$ ). Il faut préciser que ceci n'a pas de conséquence sur la forme du diagramme de rayonnement.

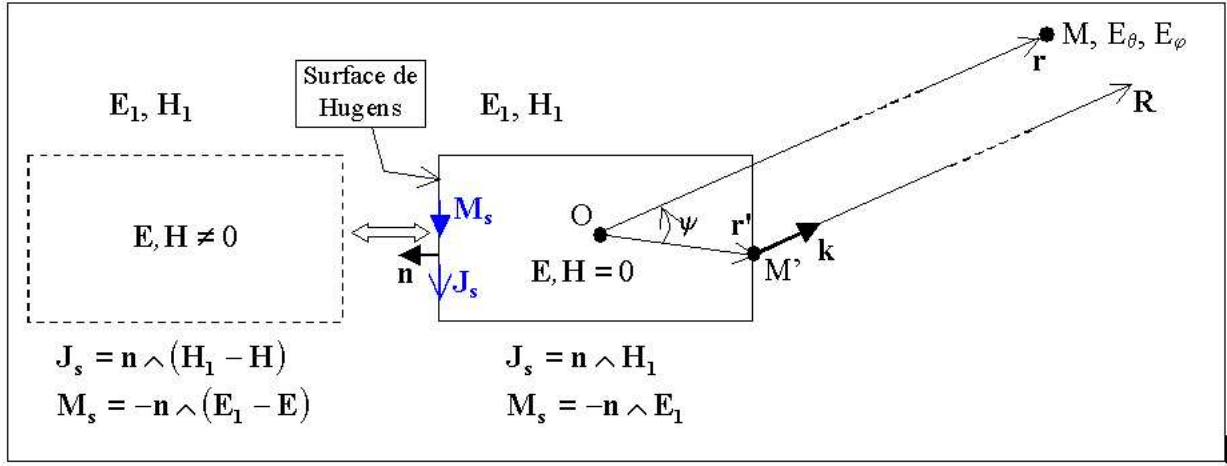


FIG. 13.3 – Calcul du champ lointain à partir de l'intégration des courants électriques et magnétiques sur une surface de Huygens.

Les champs vrais, dans le plan complexe, sont obtenus pour une distance  $r$  donnée par les relations suivantes :

$$E_{\theta, \text{vrai}}(f, r, \theta, \phi) = \frac{e^{-j2\pi fr/c}}{r} E_{\theta}(f, \theta, \phi) \quad (13.6)$$

$$E_{\phi, \text{vrai}}(f, r, \theta, \phi) = \frac{e^{-j2\pi fr/c}}{r} E_{\phi}(f, \theta, \phi) \quad (13.7)$$

En fait, le champ en sortie de TRIDIMO correspond aux composantes de la fonction caractéristique vectorielle de rayonnement notée  $\vec{F}(\vec{r})$  définie telle que :

$$\vec{E}_{\text{vrai}}(f, \vec{r}) = \frac{e^{-j2\pi fr/c}}{r} \vec{F}(f, \vec{r})$$

#### la puissance rayonnée $P_r$

La puissance rayonnée est calculée à partir de l'intégration du vecteur de Poynting sur la surface de Huygens :

$$P_r(f) = \frac{1}{2} \oint_{S_{\text{huyg}}} \left( \vec{E}(f, M') \wedge \vec{H}^*(f, M') \right) \cdot \vec{n} dS$$

$\vec{n}$  est la normale à la surface  $dS$ ,  $M'$  est un point de la surface de Huygens.

La puissance rayonnée est calculée dans TRIDIMO à partir des courants circulant sur la surface de Huygens (cf. figure 13.3) grâce à la relation suivante :

$$P_r(f) = \frac{1}{2} \oint_{S_{\text{huyg}}} \left( \vec{J}_s^*(f, M') \wedge \vec{M}_s(f, M') \right) \cdot \vec{n} dS$$

Il est à noter que dans l'espace discret au sens des différences centrées, la surface de Huygens est dédoublée. En conséquence, les composantes de  $\vec{E}$  et  $\vec{H}$  sont décalées d'un demi-pas en temps et en espace. Toutefois, les résultats obtenus montrent que la puissance rayonnée est calculée avec précision.

#### les directivités $D_{\theta}$ et $D_{\phi}$

La directivité est le rapport entre la densité de puissance rayonnée dans une direction donnée  $\vec{r}$  orientée par les angles  $(\theta, \phi)$  et la densité de puissance d'une source isotrope qui rayonnerait la même puissance que celle fournie par la surface de Huygens (donc la structure). En équation, cela donne :

– la densité de puissance dans une direction donnée :

$$p_r(f, \vec{r}) = \frac{1}{2\eta_0} \left\| \vec{E}(f, \vec{r}) \right\|^2$$

- la densité isotrope de puissance d'une source isotrope qui rayonnerait la même puissance que celle fournie par la surface de Huygens

$$p_i(f) = \frac{P_r(f)}{4\pi r^2}$$

Soit :

$$D(f, \vec{r}) = \frac{p_r(f, \vec{r})}{p_i(f)} = \frac{2\pi}{\eta_0} \frac{\left\| \vec{F}(f, \vec{r}) \right\|^2}{P_r(f)} = D_\theta(f, \vec{r}) + D_\phi(f, \vec{r})$$

$\vec{F}(\vec{r})$ , la fonction caractéristique vectorielle de rayonnement définie dans le paragraphe précédent. Dans le cas de l'application du principe des images, on considère que le rayonnement a lieu seulement dans une demi-sphère. Dès lors, la source de référence dans le calcul de la densité isotrope de puissance est une source isotrope sur une demi-sphère. On déduit alors que :

$$D(f, \vec{r})_{demi-sphère} = \frac{p_r(\vec{r})}{p_{i,demi-sphère}} = \frac{\pi}{\eta_0} \frac{\left\| \vec{F}(\vec{r}) \right\|^2}{P_r}$$

### Formule de passage du 3D au 2D

Considérons un espace 2D plan xOy et supposons que le calcul du champ lointain soit réalisé avec la transformée champ proche-champ lointain 3D. Pour passer au champ 2D réel, on suppose évidemment que la transformée champ proche - champ lointain a été réalisée dans le plan xOy ou le plan  $\phi$  ( $\theta = 90^\circ$ ) pour la zone angulaire. Dans ce cas, la relation entre le champ lointain calculé en 3D et le champ lointain réel de l'espace 2D est linéaire et s'écrit [[6], chap.7, éq.27] :

$$\vec{E}_{2D}(\phi) = \frac{1}{\Delta z} \sqrt{\frac{2\pi r c}{j\omega}} \vec{E}_{3D}(\phi)$$

Avec  $r$  la distance du centre de phase au point d'observation en champ lointain et  $\Delta z$  le pas spatial que l'on fait intervenir pour corriger les densités de courant qui sont surfaciques en 3D (densité de courant sur la surface de Huygens) alors qu'elles sont linéiques en 2D.

Cependant, le champ lointain sortie par TRIDIMO ne correspond pas au champ vrai (voir éq.13.6). Aussi, à partir du champ lointain complexe sortie par TRIDIMO, le champ 2D vrai s'écrit :

$$E_{z,2D,vrai}(f, r, \theta = 90^\circ, \phi) = -\sqrt{\frac{2\pi c}{j\omega r}} \frac{e^{-j\omega r/c}}{\Delta z} E_\theta(f, \theta = 90^\circ, \phi)$$

$$E_{\phi,2D,vrai}(f, r, \theta = 90^\circ, \phi) = \sqrt{\frac{2\pi c}{j\omega r}} \frac{e^{-j\omega r/c}}{\Delta z} E_\phi(f, \theta = 90^\circ, \phi)$$

### Surface Equivalente Radar (SER)

La surface équivalent radar est le rapport entre la puissance rayonnée par une structure dans une direction donnée et à une distance  $r \rightarrow \infty$ , et la puissance incidente de l'onde plane touchant la structure qui est distribuée uniformément sur une sphère soit :

$$SER_{3D}(\theta, \phi) = \lim_{r \rightarrow \infty} \left( 4\pi r^2 \frac{P_r(r, \theta, \phi)}{P_{inc}} \right) = 4\pi \frac{|E_\theta(\theta, \phi)|^2 + |E_\phi(\theta, \phi)|^2}{|E_{inc}|^2}$$

En 2D, la référence est la puissance incidente distribuée uniformément sur le périmètre d'un cercle soit :

$$\begin{aligned}\text{SER}_{2D}(\phi) &= \lim_{r \rightarrow \infty} \left( 2\pi r \frac{P_r(r, \phi)}{P_{inc}} \right) = 2\pi r \frac{|E_{z,2D,vrai}(\phi)|^2 + |E_{\phi,2D,vrai}(\phi)|^2}{|E_{inc}|^2} \\ \text{SER}_{2D}(\phi) &= \frac{\pi c}{\omega \Delta z^2} \text{SER}_{3D}(\theta = 90^\circ, \phi)\end{aligned}$$

### Théorie des images

La théorie des images s'applique en présence d'un plan de masse infini. Dans ce cas, la surface de Huygens est tronquée. Sur la figure 13.4, la surface de Huygens est composée d'une seule face parallèle au plan de masse. Tout d'abord, précisons que la face devra être de taille suffisamment grande afin que le champ sur ces bords soient négligeables. Ensuite, le calcul du champ lointain n'est valide que dans l'hémisphère où se trouve la surface de Huygens. En théorie, la face de Huygens se referme à l'infini sur le plan de masse. Pour le calcul, on ne considère pas l'influence du substrat. Cependant, il ne faut pas perdre de vue les hypothèse sous-jacentes : on suppose que les pertes dans le substrat (en cyan sur la figure 13.4) sont faibles. En outre, le substrat produit un déphasage qui peut être négligeable si son épaisseur est faible devant la longueur d'onde.

En rayonnement, le plan de masse réfléchit les courants de la surface de Huygens. Aussi pour le calcul du champ lointain, le plan de masse est remplacé par une surface de Huygens fictive comme sur la figure 13.4 qui de manière équivalente rayonne le même champ que le plan de masse. Les courants sur la surface de Huygens fictive sont les mêmes que ceux de la surface de Huygens réelle au signe près. Si la hauteur  $h$  de la face de Huygens par rapport au plan de masse est négligeable devant la longueur d'onde, alors le problème se simplifie car la surface de Huygens fictive n'est pas considérée. En contre partie, sur la surface de Huygens réelle, les courants parallèle ( $\parallel$ ) et perpendiculairement ( $\perp$ ) au plan de masse sont modifiés comme suit :

$$2M_{\parallel}, M_{\perp} = 0; J_{\parallel} = 0, 2J_{\perp}$$

Dans le cas d'une structure finie s'élevant au dessus du plan de masse, la surface de Huygens peut se composer de 5 faces comme sur la figure 13.5 en vue de coupe. Enfin, si le plan de masse possède une fente mince, on applique là encore la théorie des images. Dans ce cas, si on veut le rayonnement des deux cotés du plan de masse, il faudra faire deux calculs de champ lointain avec deux surfaces de Huygens comme sur l'exemple donné sur la figure 13.6.

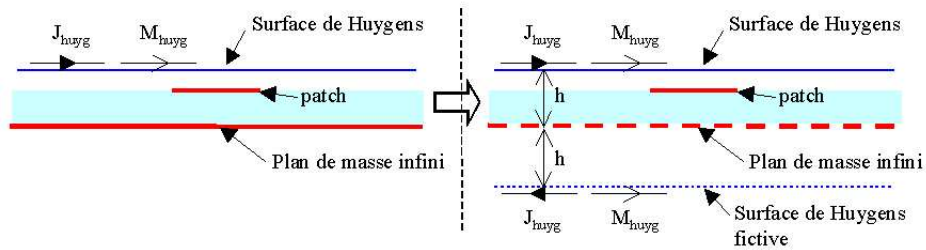


FIG. 13.4 – Théorie des images, surface de Huygens parallèle à un plan de masse infini.

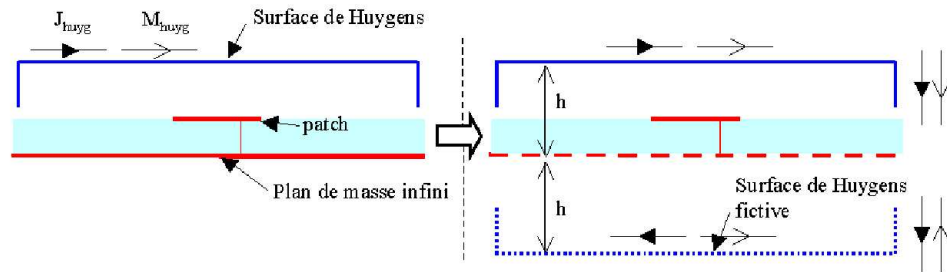


FIG. 13.5 – Théorie des images, surface de Huygens avec 5 faces, signes des courants sur la surface fictive.

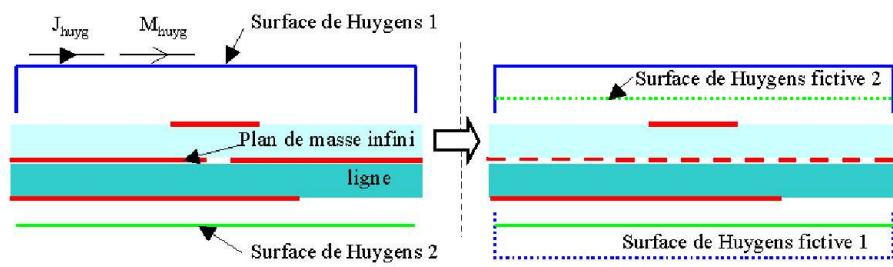


FIG. 13.6 – Théorie des images, deux surfaces de Huygens pour deux calculs de champ lointain.

# Bibliographie

- [1] A. Reineix, C. Giraudon, CH. Guiffaut, S. Demarty, O. Daffif, J. Panh, J-P. Catani, « Etude théorique de la susceptibilité de cartes dans leurs boîtier », Congrès
- [2] CEM de Grenoble, mars 2002.
- [3] K. S. Yee, « Numerical solution of initial boundary value problems involving Maxwell's equations in isotropic media », IEEE Trans. Antennas and Propagation, vol.14, 1966, pp. 302-307.
- [4] A. Taflove, « Computational electrodynamics, the finite difference time domain », Artech House, 1995.
- [5] A. Taflove, « Numerical solution of steady-state electromagnetic scattering problems using the time-dependent Maxwell's equations », IEEE Trans. on Microwave Theory and Techniques, Vol. 23, n°8, August 1975.
- [6] K. Kunz, R.J. Luebbers, « The finite difference time domain method for electromagnetics », Edition CRC, 1993.
- [7] J-P. Berenger, « A perfectly mathed layer for the absorption of electromagnetic waves », Journal of Computational Physics, vol.114, pp.185-200, 1994.
- [8] P. Clayton, « Analysis of multiconductor transmission lines », Wiley interscience, 1994.
- [9] J-P. Bérenger, « A multiwire formalism for the FDTD method », IEEE Trans. on Electromagnetic Compatibility, vol. 42, n°3, pp.227-264, August 2000.
- [10] R. Holland, Louis Simpson, « Finite difference analysis of EMP coupling to thin struts and wires », IEEE Trans. on Electromagnetic Compatibility, vol. 23, n°3, pp.88-89, May 1981.
- [11] C. Giraudon, « Contribution à la simulation électromagnétique dans le domaine temporel », thèse de Doctorat de l'Université de Limoges, Septembre 2002.
- [12] T. Hirono, Y. qshibata, W. W. Lui, S.Leki and Y. Yoshikuni, « The second-order condition for the dielectric interface orthogonal to the Yee lattice axis in the FDTD scheme », IEEE Microwave and Guided Wave Letters, vol.10, n°9, pp.359-361, September 2000.
- [13] C. M. Furse et O. P. Gandhi, « Why the DFT is faster than the FFT for FDTD time-to-frequency domain conversion », IEEE Microwave and Guided Wave Letters, vol. 5, n°10, December 1995.
- [14] J. Pereda, F. Alimenti et Al., « A new algorithm for the incorporation of arbitrary linear lumped networks into FDTD simulators », IEEE Trans. on Microwave Theory and Techniques, Vol. 47, n°6, June 1999.
- [15] J.P. Bérenger, « Introduction de circuits localisés et de charges non linéaires dans le formalisme des fils minces aux différences finies », Congrès CEM 1994 de Toulouse.