
La méthode de modelisation énactive

Nous cherchons à modéliser des phénomènes électromagnétiques à travers un système multi-agents instrumenté *via* un système de réalité virtuelle.

Les systèmes multi-agents mettent en œuvre un ensemble de concepts et de techniques permettant à des agents d'interagir avec leur environnement. Ils reposent donc sur une définition rigoureuse de ce que sont les agents, de la nature des interactions et de l'environnement dans lequel ces agents évoluent et peuvent interagir.

Aussi, la modélisation de phénomènes naturels au sein d'un environnement virtuel ne demande pas de simuler ces phénomènes tels qu'ils nous apparaissent dans la réalité mais plutôt à décrire ces phénomènes d'un point de vue phénoménologique, afin d'en extraire les caractéristiques et paramètres essentiels nécessaires à leur reconstruction au sein d'un monde virtuel.

De plus, il n'existe pas de modèle global d'un environnement naturel [Moi06]. La complexité d'un tel système contraint à une approche locale des phénomènes. Dans ce contexte, les phénomènes sont modélisés en tant qu'entités autonomes en interaction.

La méthode dite « énactive » proposée dans ces travaux, rompt radicalement avec les concepts des méthodes « classiques » présentées dans la partie précédente et propose une méthode spécifique pour la modélisation de tels systèmes complexes.

Les systèmes multi-agents

Depuis quelques années, les systèmes multi-agents (SMA) ont pris une place de plus en plus importante dans de nombreux domaines d'application, ceci à travers l'intelligence artificielle, l'informatique [Fer95], [Woo02], et aussi dans les sciences sociales, les sciences naturelles ... [Wei99], [AP06].

La modélisation multi-agents permet de conceptualiser et de simuler un ensemble organisé d'agents en interaction entre eux et avec leur environnement, et permet la formalisation de systèmes complexes comportant des échelles — spatiales, temporelles, organisationnelles — multiples et variées. Le système est alors composé d'un ensemble d'agents, situés dans un environnement et interagissant selon certaines relations.

Un agent est une entité caractérisée par le fait qu'elle est, au moins partiellement, autonome.

Un tel système doit répondre à un certain nombre de problématiques :

- **relations entre l'agent et l'environnement** : un agent doit être capable d'interagir au sein de l'environnement.
⇒ *notions de perception, de décision, d'action.*
- **nature des interactions** : Quels types d'interactions, qui interagit avec qui et de quelle manière ?
⇒ *notions d'adaptation, d'apprentissage ... mais aussi de communication.*
- **temps des interactions** : À quel moment et pendant combien de temps ?
⇒ *notions d'instant, de durée de l'action mais aussi de zone de perception, détection.*

Ces différents éléments ont pour but de répondre à la question fondamentale des systèmes multi-agents qui porte sur la représentation de l'environnement par les agents : *Comment un ensemble d'agents interagit dans un environnement partagé, et comment cet environnement interagit sur ces agents ?*

La notion d'*objet*¹ apporte tout un ensemble de concepts et une méthodologie pour la formalisation et la modélisation de tels systèmes. Elle permet de créer une représentation abstraite, sous forme d'objets, d'entités ayant une existence matérielle ou virtuelle.

Un objet est caractérisé par plusieurs propriétés :

- ses attributs : paramètres, données qui caractérisent les propriétés de l'objet.
- ses méthodes : « fonctions » qui caractérisent le comportement de l'objet.
- son identité : chaque objet est caractérisé par un identifiant propre qui le distingue des autres objets.

Ceci permet de conceptualiser ce qu'est un agent. Aussi, l'architecture des systèmes multi-agents repose sur différents éléments : les agents, l'environnement et les interactions.

Les systèmes multi-agents permettent la modélisation de systèmes complexes, là où la formalisation mathématique n'apporte pas de solution analytique. Cependant, la formalisation d'un problème *via* un système multi-agents et la caractérisation de son architecture dépend avant tout de ce que nous cherchons à modéliser. Il est donc important de conceptualiser et de formaliser de manière explicite ce dont nous avons besoin.

Nous cherchons à suivre l'évolution d'une onde électromagnétique (front d'onde) et ses interactions éventuelles avec des objets de dimensions variées² placés dans une scène. Notre modèle doit donc reposer sur une description précise des milieux de propagation, supports des interactions, et des phénomènes électromagnétiques associés tels que :

- la propagation
- la réflexion et la réfraction
- la diffraction

1. Au sens de la *programmation orientée objet*.

2. Objets électriquement petits ou grands.

La modélisation de phénomènes électromagnétiques par une approche multi-agents nécessite de définir un certain nombre de concepts et une certaine méthodologie quant à la formalisation et à l'implémentation informatique d'un tel système.

Bien que cette approche soit particulièrement nouvelle dans le domaine des hyperfréquences, ce n'est pas forcément le cas dans d'autres domaines et notamment en informatique, en science sociale ou bien encore en biologie par exemple où les concepts d'agents semblent plus pertinents que n'importe quel modèle mathématique.

En effet, cette approche permet de faire émerger naturellement, à partir de lois simples, des comportements d'ensemble qui ne sauraient trouver une solution par une « simple » description mathématique comme l'émergence de comportements macroscopiques à partir de lois microscopiques. Aussi, elle permet de définir des niveaux de modélisation à des échelles multiples. De plus, l'ajout de nouveaux phénomènes ne remet pas en cause le système.

Les réponses à ces questions doivent permettre de formaliser le problème de manière pertinente afin de construire une méthodologie suffisamment précise pour être capable d'implémenter un tel système *via* l'ensemble des outils informatiques disponibles.

La méthode de modélisation énaactive constitue une approche originale pour la modélisation d'un tel environnement.

La méthode énaactive

La méthode de modélisation énaactive [PT05] constitue une approche atypique pour la modélisation dynamique d'un environnement naturel et sa simulation en un système de réalité virtuelle [Tis01]. Elle est basée sur le principe d'énaaction³ [VTR91], [Tho07], principe qui vise à étudier par ses interactions, un individu (une entité) et son environnement : « L'organisation énaactive résultante de la modélisation est alors composée d'entités autonomes en interaction *via* un milieu qu'elles créent et façonnent elles-mêmes » [Par04].

Il n'existe pas de modèle global d'un environnement naturel. La complexité d'un tel système contraint à une approche locale des phénomènes et à en répartir le contrôle au niveau des composants du système. Chaque individu, chaque composant du système ne connaît et n'a accès qu'à une portion de l'ensemble des connaissances ; c'est la cohabitation de chacun d'entre eux, apportant ses connaissances locales qui fait du monde ce qu'il est dans sa globalité.

Dans ce contexte, les phénomènes sont modélisés en tant qu'entités autonomes en interaction. Ceci introduit la notion de modélisation multi-agent qui permet de conceptualiser et de simuler un ensemble organisé d'agents en interaction entre eux et avec leur environnement. Aussi elle permet de formaliser des situations complexes comportant des échelles de temps et d'espace pouvant être très différentes.

Reconstituer les phénomènes au sein d'un environnement virtuel ne demande pas de considérer ces phénomènes tels qu'ils nous apparaissent dans la réalité. Cela n'a pas de

3. Selon ce principe, le phénomène cognitif est indissociable de l'environnement dans lequel il se produit.

sens pour une onde électromagnétique de percevoir son environnement, pas plus que d'appliquer telle ou telle méthode pour adapter sa propagation et interagir avec les objets de l'environnement ; ceci est une représentation de notre esprit pour comprendre et expliquer les phénomènes qui peuvent avoir lieu.

La modélisation d'un système complexe énaactif nécessite d'autonomiser les modèles associés. L'autonomisation d'un modèle consiste à le doter de capacités de perception, d'action et de décision au sein de son environnement. C'est une contrainte nécessaire afin de ne pas avoir à remettre en cause le modèle lors de l'introduction de nouveaux phénomènes dans le système ainsi modélisé. Chaque modèle de phénomène est vu comme une entité autonome.

Autonomiser le modèle d'un phénomène naturel en le dotant de capacités de perception et d'adaptation ne demande pas de considérer le phénomène comme ayant ces capacités. Le phénomène réel est naturellement inscrit dans un monde physique. En revanche, en réalité virtuelle, il faut reconstituer virtuellement ce monde physique. Il est alors plus simple si chaque modèle est capable de construire de façon autonome le milieu nécessaire à la réalisation de son comportement.

Dans ce contexte, la simulation d'un tel modèle tient avant tout à la phénoménologie des phénomènes plutôt que de réaliser la simulation de ces phénomènes, ce qui reviendrait à résoudre un système différentiel. La modélisation d'un tel système ne requiert plus *a priori* d'échantillonner l'espace d'analyse pour construire le milieu topologique spatio-temporel. Chaque entité participe par ses interactions à la construction d'un *monde*.

Le développement de cette nouvelle méthode est basée sur une bibliothèque de simulation d'entités autonomes et de rendu 3D, écrite en C++, nommée ARéVi⁴ et développée au CERV⁵. Cette bibliothèque fournit une collection d'outils pour simplifier l'écriture d'applications de réalité virtuelle. Elle fournit notamment :

- de quoi doter les entités d'activités, de gérer leur ordonnancement et de les faire communiquer entre elles.
- des moyens d'interactions avec l'utilisateur qui permettent à celui-ci de pouvoir participer au sein même de l'environnement virtuel.
- d'un ensemble d'objets 3D.

Pour obtenir une description plus détaillée de cette bibliothèque, on pourra se reporter au lien de la note d'ARéVi (*cf.* bas de page). Cette bibliothèque a permis de développer un ensemble de modèles réalistes et performants pour des applications très diverses, *cf.* Figs. 5.1 et 5.2, telles que :

- l'environnement de formation à la conduite automobile en trafic routier ARéVi-Road⁶ [Her06].
- l'application GASPARG⁷ qui permet de simuler l'activité aérienne sur un porte-avions [MSQB06].

4. Atelier de **R**éalité **V**irtuelle : http://svn.cerv.fr/trac/ARéVi/wiki/home_fr

5. Centre **E**uropéen de **R**éalité **V**irtuelle : <http://www.cerv.fr/fr/activites/ARéVi.php>

6. <http://www.areviroad.com/>

7. **G**estion **A**viation **S**ur **P**orte-**A**vions par la **R**éalité virtuelle.

- le modèle éactif de mer virtuelle IPAS⁸ [Par04], [PJT04].
- le modèle éactif de thermodynamique moléculaire [CBP⁺10].



FIGURE 5.1 – Exemple de modèles (non-éactifs) basés sur ARéVi.

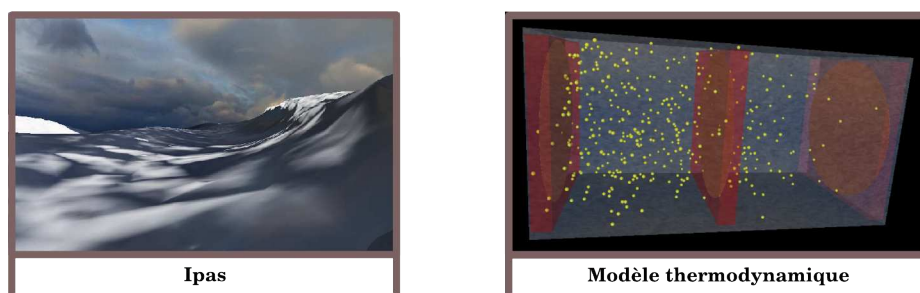


FIGURE 5.2 – Exemple de modèles éactifs basés sur ARéVi.

Notons que le modèle éactif de thermodynamique moléculaire est basé sur le même « code générique » que celui utilisé pour implémenter notre modèle éactif électromagnétique. Pour être plus précis, ce code a été développé à la base pour modéliser des phénomènes de thermodynamique moléculaire et nous nous en sommes servi en l’adaptant à nos phénomènes électromagnétiques.

5.3 Application aux systèmes électromagnétiques

L’objectif de ces travaux est de développer un nouvel outil et un simulateur électromagnétique basé sur les approches des systèmes multi-agents et la méthode de modélisation éactive ; et instrumenté *via* un système de réalité virtuelle. La démarche conceptuelle du modèle doit répondre à un certain nombre de questions lors de la formalisation du modèle et notamment celles des phénomènes à modéliser, dans quels milieux et par quelles entités les modéliser afin de reconstituer un système électromagnétique cohérent.

Nous cherchons à modéliser la propagation des ondes électromagnétiques à travers un système complexe éactif en développant un laboratoire virtuel (virtuoscope⁹), d’où

8. Animation Phénoménologique de la Mer, en anglais *Interactive Phenomenological Animation of the Sea*.

9. cf. glossaire : http://www.cerv.fr/fr/page_pres_manifeste.php

le terme *in virtuo*, dans lequel un système dynamique décrit les phénomènes et les interactions électromagnétiques. La méthode de modélisation énaactive offre un formalisme et une méthodologie pour la modélisation d'un environnement tel que le nôtre. Il s'agit de modéliser un système complexe, c'est-à-dire un système où de nombreux phénomènes interagissent de nombreuses façons à des échelles de temps et d'espace pouvant être très différentes.

La méthodologie des systèmes multi-agents consiste à identifier et décrire de manière explicite les différents éléments constituant le système à savoir l'environnement, les agents (entités) qui le peuple et les interactions qui peuvent y avoir lieu.

Aussi, un des avantages de ce type d'approche est de pouvoir intégrer des modèles de plusieurs types d'agents au sein d'une même simulation. Cette possibilité très originale permet de rendre compte des incohérences entre modèles décrivant des processus différents et interagissant entre-eux.

L'aspect visualisation dynamique du système est également un des aspects fondamentaux du succès du développement de telles méthodes car il permet au-delà de l'aspect pédagogique voire ludique, de développer et comprendre plus rapidement et ce avec davantage de facilité le système ainsi étudié.

5.3.1 Les entités

D'un point de vue général, un agent est une entité douée de capacités plus ou moins développées pour percevoir, agir et prendre des décisions au sein de son environnement. Une entité est caractérisée par le fait qu'elle est, au moins partiellement, autonome ; elle doit l'être suffisamment pour pouvoir prendre des initiatives dans l'intention d'atteindre son but (si elle en a un) ou bien d'appliquer certains de ses savoir-faire suite à un *stimulus*¹⁰ ou plusieurs *stimuli*.

Pour que l'ensemble des agents constitue un système cohérent, ils doivent pouvoir avoir un certain degré de coopération entre eux, c'est-à-dire avoir la capacité de communiquer et échanger des informations entre-eux mais aussi avec leur environnement afin d'être capables d'y interagir et de s'y adapter de manière cohérente. La communication et l'échange d'information suggèrent d'être capable de percevoir l'environnement et l'ensemble, ou du moins une partie, des éléments qui le constituent. Une entité est donc sensible à son environnement et ce dans une certaine limite ; elle possède par conséquent une certaine zone de perception qui par définition, est souvent restreinte.

La modélisation de phénomènes électromagnétiques consiste à modéliser la propagation d'une onde, ou plutôt d'un front d'onde, électromagnétique et ses interactions avec les différents objets d'une scène de simulation. Dans ce contexte, nous pouvons distinguer les différents éléments constitutifs de notre modèle :

- des ondes électromagnétiques \implies fronts d'ondes.
- des milieux électromagnétiques \implies les milieux de propagation.

10. Un stimulus est un facteur externe ou interne susceptible de provoquer un changement de comportement, une modification de l'état d'un « sujet ». Le « sujet » doit donc être sensible (au sens philosophique du terme), c'est-à-dire susceptible de percevoir par des sens, ou plus largement, par un ensemble d'impressions et de représentations.

Les entités sont les *briques élémentaires* de notre système. Elles sont une représentation du monde physique. Ce sont elles qui vont construire de par leurs interactions le milieu électromagnétique nécessaire à la reconstitution de phénomènes réels au sein d'un environnement virtuel. Parmi ces entités, nous pouvons distinguer les ondes et les milieux électromagnétiques.

Les ondes électromagnétiques et les phénomènes associés sont modélisés en tant qu'entités autonomes ; ce sont plus exactement des fronts d'ondes. Les milieux étant supposés linéaires, homogènes et isotropes (hypothèse LHI), ces entités sont transparentes les unes aux autres et on peut donc appliquer le principe de superposition.

Les milieux électromagnétiques sont un autre type d'entité. Ces milieux sont les supports de la propagation des ondes. En effet, une onde est forcément associée à un milieu — sans quoi elle ne pourrait se propager — avec lequel elle peut interagir. Nous supposons dans nos modèles des milieux diélectriques ou conducteurs avec ou sans pertes. Si le milieu n'est pas précisé, c'est qu'il est supposé être constitué d'air (vide). Ces entités ont la particularité d'avoir une représentation physique¹¹ dans le monde réel (excepté l'air). De plus, la vitesse de déplacement relative d'un milieu (assimilé à un objet) est négligeable par rapport à celle d'une onde électromagnétique. De ce fait, nous considérons des milieux (objets) immobiles.

Aussi, chaque entité possède des propriétés, des méthodes (fonctions) et des activités (relation avec le temps) qui lui sont propres et lui permettent de percevoir son environnement et d'y interagir en « temps réel ».

Ces ondes et ces milieux vont pouvoir interagir ensemble. Il nous faut désormais caractériser ces interactions et les phénomènes qui y sont associés.

5.3.2 Les interactions

Les interactions qui peuvent avoir lieu dépendent de la nature des phénomènes électromagnétiques que nous cherchons à modéliser et de la dimension du modèle considéré (1D, 2D, 3D). D'une manière générale, ces phénomènes sont :

- la propagation d'une onde dans un milieu.
- la réflexion d'une onde à l'interface entre deux milieux.
- la réfraction d'une onde d'un milieu vers un autre.
- la diffraction d'une onde sur les coins ou arêtes d'un milieu.

Ce sont principalement des interactions du type ondes/milieux. Cependant, la reconstitution de phénomènes physiques au sein d'un environnement virtuel nécessite de développer des outils (instruments) de « mesure » virtuels afin d'être capable de récupérer certaines informations de l'environnement et notamment le champ électromagnétique. De ce fait, nous devons considérer des interactions supplémentaires du type ondes/instruments.

11. Ce sont des milieux matériels constitués par un matériau et donc palpables (à l'exception de l'air).

5.3.3 Les instruments de « mesure »

Nous désirons connaître à l'issue de la simulation d'un système électromagnétique, le champ électromagnétique en un point ou une région de l'espace. Cela nécessite d'être en mesure de « mesurer » ce champ et par conséquent de développer des outils pour quantifier ou cartographier le champ électromagnétique en un point ou une région de l'espace. Pour cela, nous avons développé plusieurs instruments :

- cellule de lecture \implies lecture locale de l'état du champ électromagnétique.
- carte de champ \implies cartographie par une échelle de couleur de l'état du champ électromagnétique dans une région de l'espace.

Ces instruments sont un autre type d'entité et participent au même titre que les ondes et les milieux électromagnétiques à la simulation et à certaines interactions.

5.4 Exemples de scénarios

La validation totale de notre modèle énaactif d'un système complexe électromagnétique est forcément expérimentale et repose sur la simulation. Seule la simulation peut nous permettre de valider (ou non) l'ensemble des concepts de cette méthode de modélisation. Nous ne possédons pas d'autres moyens pour vérifier d'une quelconque manière (mathématique, ...) notre modèle.

Pour cela, nous avons développé deux modèles électromagnétiques, l'un unidimensionnel (1D) et l'autre bidimensionnel (2D) ; et nous avons imaginé pour chacun de ces modèles un ensemble de scénarios afin de caractériser certaines des propriétés électromagnétiques des ondes et des milieux. Nous allons simuler *in virtuo* un ensemble d'expériences que nous devons bien entendu être en mesure de comparer avec la théorie (lorsque c'est possible) ou des outils de modélisation plus classiques et appropriés.

Scénarios 1D	Caractérisation
propagation dans l'air	\implies évolution.
réflexion sur une structure	\implies coefficients de réflexion.
réfraction sur une structure	\implies coefficients de transmission.
cavité résonante	\implies résonance des modes.

Scénarios 2D	Caractérisation
propagation dans l'air	\implies évolution.
diffraction sur une structure	\implies coefficients de diffraction.
environnement en espace ouvert	\implies carte de champ.
cavité résonante	\implies résonance des modes.

Chapitre 6

Les entités

Nous venons d'établir dans le chapitre précédent ce qu'est notre système éactif électromagnétique et la manière dont celui-ci doit être formalisé. Un tel système est constitué d'un environnement peuplé d'entités autonomes qui interagissent entre-elles et avec leur environnement. Ce dernier est le « support » des interactions et délimite le domaine de validité, c'est-à-dire le domaine d'existence des entités.

Aussi, nous désirons connaître à l'issue de la simulation, le champ électromagnétique en un point ou une région de l'espace.

Notre système éactif électromagnétique est alors constitué par :

- des ondes électromagnétiques \implies fronts d'ondes.
- des milieux électromagnétiques \implies les milieux de propagation.
- des instruments de mesure \implies cellules de lecture ou cartes de champ électromagnétique.

Ces différents éléments doivent être situés dans l'espace ; ils sont localisés et possèdent par conséquent une certaine forme finie. Il nous faut donc définir quelle représentation géométrique nous leur associons, celle-ci étant conditionnée par la nature de l'entité et la dimension du modèle¹ considéré.

Le développement de nos modèles électromagnétiques est basé sur une bibliothèque de simulation d'entités autonomes et de rendu 3D nommée ARéVi, *cf.* Section 5.2 p. 69. Cette bibliothèque met à notre disposition un ensemble d'outils et d'objets 3D tels que des boîtes (du type parallélépipèdes rectangles), des sphères, des cylindres et des cônes par exemple. De plus, elle offre un ensemble de méthodes et un ordonnanceur pour la gestion et l'organisation des activités des entités.

La modélisation éactive de problèmes de propagation électromagnétique doit reposer sur une définition d'entités rigoureuse. Pour cela, il nous faut partir de descriptions simplifiées des phénomènes à modéliser de façon à dégager les paramètres essentiels de nos entités.

6.1 Les ondes électromagnétiques

Une entité *onde électromagnétique* est la représentation virtuelle d'une onde physique. Elle doit par conséquent être définie explicitement en tant que telle et posséder une description et un contenu électromagnétique.

1. On entend ici dimension spatiale du modèle : uni-(1D), bi-(2D) voire tri-(3D) dimensionnelle.

6.1.1 L'onde monochromatique

Le modèle d'une onde monochromatique² est souvent utilisé pour décrire et comprendre l'ensemble des phénomènes électromagnétiques. Cependant, ce modèle n'est pas physique. En effet, il n'existe pas naturellement d'ondes monochromatiques car celles-ci ont une énergie infinie puisqu'elles sont définies pour tout temps t ($\forall t$) et dans tout l'espace (\forall la direction de propagation).

Pour pallier ce problème, on a alors recours à une méthode de décomposition spectrale afin de décomposer une onde en plusieurs ondes monochromatiques : le paquet d'ondes. La superposition de ces ondes monochromatiques permet de reconstruire une onde réelle c'est-à-dire à énergie finie, limitée dans le temps et l'espace. En théorie, il faudrait sommer une infinité d'ondes pour reconstituer une onde réelle.

6.1.2 Le paquet d'ondes

Une onde monochromatique n'a ni début ni fin et possède donc une énergie infinie, ce qui physiquement n'est pas acceptable. Une onde physique doit nécessairement avoir une extension spatiale et temporelle limitées pour pouvoir propager de l'énergie. Une telle onde peut alors être décrite comme une combinaison linéaire d'ondes monochromatiques, plus couramment appelée un paquet d'ondes ou train d'ondes.

On considère un paquet d'ondes autour d'une fréquence centrale f_0 (pulsation ω_0). Un paquet d'ondes est une superposition d'ondes de pulsations voisines, situées dans un intervalle restreint $\delta\omega$ autour d'une pulsation centrale ω_0 . Le paquet d'ondes est donc localisé dans une largeur de bande $\Delta\omega = 2 \delta\omega$. Une telle superposition conduit à une onde de la forme :

$$E(r, t) = \frac{1}{2\pi} \int_{\omega_0 - \delta\omega}^{\omega_0 + \delta\omega} A(\omega) e^{-j(\omega t - k(\omega)r)} d\omega \quad (6.1.1)$$

où

. $A(\omega)$ est la densité spectrale d'amplitude qui est une fonction à valeurs complexes :

$$A(\omega) = \frac{1}{2\pi} \int_{-\infty}^{+\infty} E(0, t) e^{j\omega t} dt \quad (6.1.2)$$

. $k(\omega)$ est le vecteur d'onde :

$$k(\omega) = k(\omega_0) + (\omega - \omega_0) \left. \frac{\partial k}{\partial \omega} \right|_{\omega_0} \quad (6.1.3)$$

où

$$k(\omega_0) = k_0 \quad v_\varphi = \omega_0/k_0 \quad v_g = \left. \frac{d\omega}{dk} \right|_{k_0} \quad (6.1.4)$$

2. Onde composée d'une seule fréquence f_0 (pulsation ω_0) du type :

$$U = U_0 \sin(2\pi f_0 t + \varphi_0) = U_0 \sin(\omega_0 t + \varphi_0)$$

où U_0 et φ_0 sont respectivement l'amplitude et la phase à l'origine.

Plus le paquet d'ondes est composé d'un nombre important d'ondes et plus l'impulsion, c'est-à-dire l'étendue du signal (dans le temps), diminue. Aussi, plus une impulsion est courte et plus sa largeur de bande (distribution en fréquence) est large. *A contrario*, un paquet d'ondes composé de peu d'ondes aura une impulsion plus large et par conséquent une largeur de bande plus étroite. On voit bien ici la dualité « temps-fréquence » qui lie les représentations temporelle et spectrale d'une impulsion, *cf.* Fig. 6.1.

Nous pouvons alors réécrire l'Eq. (6.1.1), en utilisant les propriétés (6.1.3) et (6.1.4), sous la forme :

$$E(r, t) = \frac{1}{2\pi} \int_{\omega_0 - \delta\omega}^{\omega_0 + \delta\omega} A(\omega) e^{-j\omega_0 \left(t - \frac{r}{v_\varphi}\right)} e^{-j(\omega - \omega_0) \left(t - \frac{r}{v_g}\right)} d\omega \quad (6.1.5)$$

Nous pouvons remarquer que ce paquet d'ondes s'écrit comme le produit d'un terme de phase, oscillant rapidement avec la pulsation ω_0 à la vitesse de phase v_φ , et d'un terme de groupe représentant l'enveloppe de l'onde qui se propage à la vitesse de groupe v_g . Dans le cas d'un paquet d'ondes gaussien, cela signifie que l'enveloppe est de forme gaussienne.

La vitesse de groupe v_g représente la vitesse de déplacement de l'enveloppe du paquet d'ondes, c'est-à-dire de l'énergie, tandis que la vitesse de phase v_φ représente la vitesse de la phase. Cette dernière peut être supérieure ou inférieure à la vitesse de groupe. Aussi, elle (v_φ) peut être supérieure à la vitesse de la lumière dans le vide c_0 , contrairement à la vitesse de groupe qui ne peut physiquement se déplacer plus vite que celle-ci (c_0).

Si le milieu de propagation est non-dispersif, la vitesse de phase est égale à la vitesse de groupe : $v_\varphi = v_g$.

Si le milieu de propagation est dispersif³, le paquet d'ondes se propage en se déformant ; on observe un étalement du paquet d'ondes et on a alors $v_\varphi \neq v_g$. La déformation du paquet s'interprète en considérant que chaque composante sinusoïdale du paquet d'ondes se propage à une vitesse différente de celles des autres ce qui a pour conséquence de déformer le paquet. Les plus rapides prennent de l'avance (hautes fréquences) tandis que les plus lentes (basses fréquences) prennent du retard. De ce fait, la notion de paquet d'ondes permet de mieux décrire la réalité et de tenir compte de milieux dispersifs.

6.1.3 Dualité temps-fréquence, le principe d'incertitude

Les représentations temporelle et spectrale d'une impulsion sont intimement liées. Il existe un lien très étroit entre ces deux domaines d'analyse, qui contraint d'une certaine manière les phénomènes observables ; ceci peut s'énoncer par le principe d'incertitude : *un signal ne peut être concentré simultanément en temps et en fréquence.*

Plus la durée temporelle d'un signal est courte et plus sa largeur de bande dans le domaine fréquentiel s'élargit. *A contrario*, plus cette durée est longue et plus la largeur de bande se rétrécit. Le principe d'incertitude ne décrit pas une limitation à notre connaissance de la réalité ; il décrit cette réalité [Hub95].

3. Notion limitée au paquet d'ondes.

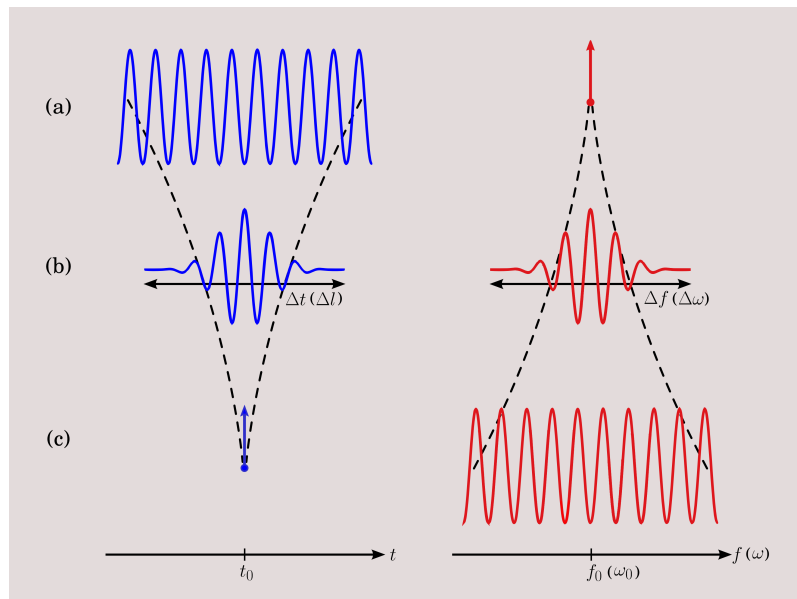


FIGURE 6.1 – Représentation du principe d’incertitude temps-fréquence. Représentations temporelles d’une onde (a), d’un paquet d’ondes (b) et d’un corpuscule (c). Une onde monochromatique (a) ne peut être localisée précisément dans le temps, ni dans l’espace. En revanche, son spectre est très bien localisé en fréquence. À l’inverse, une impulsion (c) n’a pas de fréquence propre et recouvre entièrement le spectre. Le paquet d’ondes (b) par contre est bien distribué dans le temps et en fréquence.

Pour toute excitation $f(t)$ d’énergie finie, avec Δt et Δf ($\Delta\omega$) finis, le principe d’incertitude temps-fréquence nous donne la relation suivante :

$$\Delta t \cdot \Delta f \geq \frac{1}{4\pi} \iff \Delta t \cdot \Delta\omega \geq \frac{1}{2} \quad (6.1.6)$$

où

- . Δt : durée temporelle \Rightarrow *temps* s
- . Δf : bande passante \Rightarrow *fréquence* Hz
- . $\Delta\omega$: bande passante \Rightarrow *pulsation* rad/s

Cette inégalité devient égalité si $f(t)$ est une gaussienne.

Ce principe d’incertitude temps-fréquence est aussi appelé inégalité d’Heisenberg-Gabor. Elle trouve son fondement dans les relations d’incertitudes fixées par Heisenberg [Hei27], et dont l’analogie avec les travaux d’Heisenberg pour la transformée de Fourier a été faite par Gabor [Gab46].

Cette relation (6.1.6) est une équivalence du principe d’incertitude d’Heisenberg. Ce principe repose sur la dualité *onde-corpuscule* de la lumière, c’est-à-dire sur la nature à la fois ondulatoire (fréquence, vecteur d’onde) et corpusculaire (énergie, impulsion) de la lumière. Elle signifie qu’on ne peut être à la fois précis en temps (ni dans l’espace) et en fréquence, *cf.* Fig. 6.1. Dans ce contexte, c’est la gaussienne qui a la meilleure localisation temps-fréquence. Aussi, pour posséder une fréquence et un vecteur d’onde, un *objet* doit nécessairement avoir une certaine extension spatiale et temporelle limitées.

6.1.4 Le modèle du paquet d'onde(s) en tant qu'entité *onde électromagnétique*

La modélisation énaactive sous sa forme informatique nous impose, d'une part que la simulation soit temporelle, et d'autre part que les entités doivent être situées dans le milieu. L'entité capable de répondre au mieux à ces exigences est le paquet d'onde(s)⁴. De plus, ce concept est le seul qui soit utilisé en électromagnétisme pour décrire des phénomènes large bande tels que la dispersion. Aussi, nous choisissons un paquet d'onde gaussien au vu du caractère classique de son emploi, *cf.* Fig. 6.2.

Un tel paquet d'onde électromagnétique est caractérisé par (*cf.* Annexe A) :

- une amplitude E_0
- une phase φ_0
- une fréquence centrale f_0 (pulsation ω_0)
- une vitesse de phase v_φ
- une vitesse de groupe v_g
- un vecteur d'onde \vec{k}_0
- une étendue spatiale Δl
- une étendue temporelle Δt
- une largeur de bande Δf (ou de pulsation $\Delta\omega$)
- un écart-type σ_0 pour l'enveloppe gaussienne

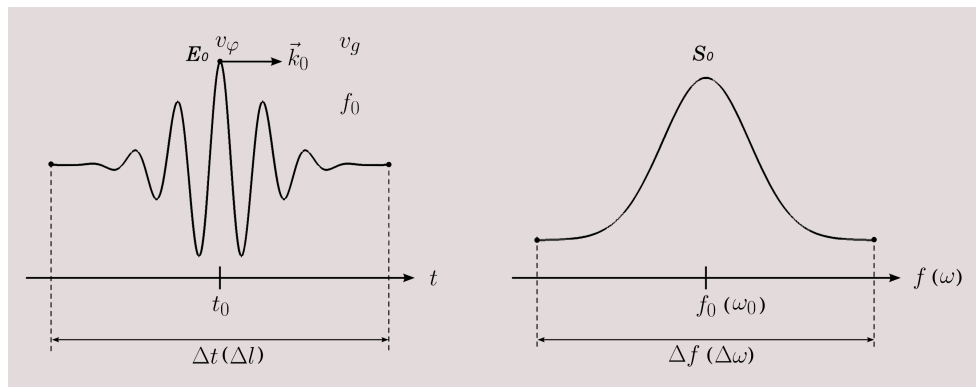


FIGURE 6.2 – Représentation d'un paquet d'onde (monoporteuse) gaussien dans les domaines temporel et fréquentiel.

Un paquet d'ondes est naturellement polychromatique ; il est constitué d'une multitude de fréquences. Cependant dans certains problèmes, et notamment lorsque nous traitons de milieux non-dispersifs⁵, il peut être plus facile de travailler avec un paquet d'onde *monoporteuse*, c'est-à-dire un paquet centré à la fréquence propre de l'impulsion⁶ et possédant une certaine largeur de bande ; celui-ci possède par conséquent une certaine limitation spatio-temporelle, condition nécessaire à la définition d'une entité dans notre modèle énaactif.

4. On parlera de paquet d'**onde**, resp. d'**ondes**, lorsque le paquet est **monoporteuse**, resp. **multi-porteuse**.

5. Notons que dans ce cas, la vitesse de phase est égale à la vitesse de groupe : $v_\varphi = v_g$

6. L'impulsion étant un sinus modulé par une gaussienne.

En effet, dans le cas de milieux non-dispersifs les paramètres et propriétés des milieux ne dépendent pas de la fréquence. Aussi, un paquet d'onde doit suffire à pouvoir caractériser les propriétés de tels milieux. Ceci n'est plus le cas lorsque nous traitons de milieux à pertes ou dispersifs. Il faudra alors être capable de décomposer ce paquet d'onde en un paquet d'ondes par une méthode de décomposition spectrale, cf. Fig. 6.3. Cette méthode est décrite avec force et détails dans l'Annexe C. Nous veillerons donc à bien distinguer par la suite un **paquet d'onde** (monoporteuse) d'un **paquet d'ondes** (multiporteuse).

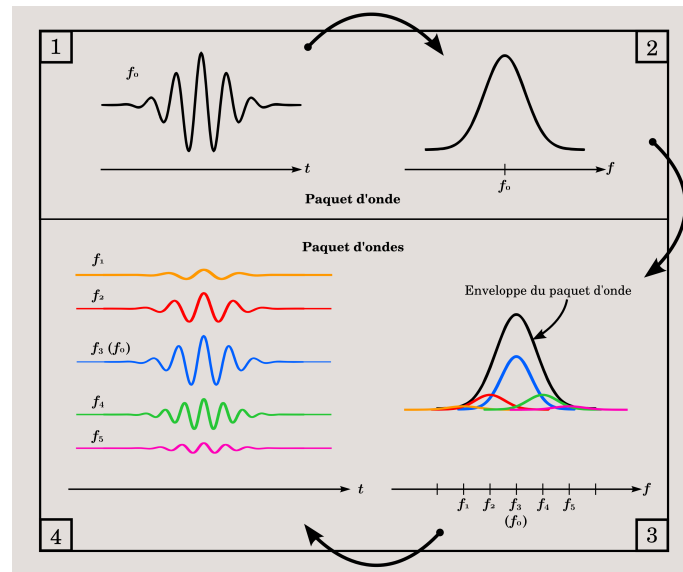


FIGURE 6.3 – Illustration du principe de la décomposition spectrale d'un paquet d'onde gaussien en un paquet d'ondes gaussien.

Un paquet d'onde est défini dans le domaine temporel (étape 1). La méthode de décomposition spectrale consiste à décomposer son spectre (étape 2) en un certain nombre de « sous-paquets d'onde » définis sur des sous-domaines (étape 3) et pondérés par des coefficients adéquats à déterminer. Ceux-ci doivent ensuite être recomposés dans le domaine temporel pour constituer un paquet d'ondes (étape 4).

A priori, les paramètres du paquet d'onde ne sont pas indépendants. En effet, il existe un lien étroit entre l'étendue temporelle Δt du paquet d'onde et sa largeur de bande Δf . De plus, nous devons définir rigoureusement cette largeur de bande Δf ainsi que l'étendue spatiale Δl du paquet d'onde qui se doit d'être finie. D'après les Eqs. (A.19), (A.26) et (A.27) de l'Annexe A, nous obtenons les relations suivantes qui relient σ_0 , Δf , Δt et Δl :

$$\Delta f = \frac{\sqrt{2}}{\pi \sigma_0} \operatorname{erf}^{-1}(\tau_0) \quad (6.1.7)$$

$$\Delta t = 2\sqrt{2} \sigma_0 \operatorname{erf}^{-1}(\tau_0) \quad (6.1.8)$$

$$\Delta l = \frac{\Delta t}{c} \quad (6.1.9)$$

où

- . c est la célérité de l'onde électromagnétique dans le milieu.
- . τ_0 est le taux de conservation (troncature) du signal du paquet d'onde.
- . erf^{-1} est la fonction erreur inverse.

6.2 Modèles géométriques des ondes électromagnétiques

Les ondes électromagnétiques sont modélisées en tant que paquet d'onde(s). Plus exactement, si l'environnement est constitué de milieux sans pertes resp. avec pertes, on utilisera le modèle du paquet d'onde resp. du paquet d'ondes.

Ces entités doivent posséder une certaine forme géométrique, limitée dans l'espace, qui dépend de la nature de l'onde. Nous devons donc trouver une représentation géométrique appropriée de ces paquets d'onde(s) à partir de leur caractéristiques. Pour cela, il nous faut connaître de quelle manière est décrite la propagation d'une onde électromagnétique.

6.2.1 La propagation des ondes

La propagation des ondes est un phénomène qui décrit l'évolution d'une onde en fonction du temps. En électromagnétisme, elle est modélisée par deux équations d'onde, une pour le champ électrique \vec{E} et une pour le champ magnétique \vec{H} .

6.2.2 Les équations de propagation des ondes

Les équations de propagation des ondes dans un milieu peuvent s'exprimer sous forme différentielle⁷ ou sous forme harmonique⁸ en remplaçant la dérivée par rapport au temps par $j\omega$. Les grandeurs associées aux équations de propagation sous forme différentielle ou harmonique sont du type :

$$U(r, t) = U(r) e^{j\omega t} \quad \Longleftrightarrow \quad U(r, \omega) = j\omega U(r) \quad (6.2.1)$$

Dans le vide ou dans un milieu diélectrique sans pertes, ces équations s'expriment :

$$\Delta \vec{E} - \mu\varepsilon \frac{\partial^2 \vec{E}}{\partial t^2} = 0 \quad \Longleftrightarrow \quad \Delta \vec{E} - \omega^2 \mu\varepsilon \vec{E} = 0 \quad \Longleftrightarrow \quad \Delta \vec{E} = \beta^2 \vec{E} \quad (6.2.2)$$

$$\Delta \vec{H} - \mu\varepsilon \frac{\partial^2 \vec{H}}{\partial t^2} = 0 \quad \Longleftrightarrow \quad \Delta \vec{H} - \omega^2 \mu\varepsilon \vec{H} = 0 \quad \Longleftrightarrow \quad \Delta \vec{H} = \beta^2 \vec{H} \quad (6.2.3)$$

Dans un milieu conducteur ou diélectrique à pertes, ces équations s'expriment :

$$\Delta \vec{E} - \mu\varepsilon \frac{\partial^2 \vec{E}}{\partial t^2} = -\mu\sigma \frac{\partial \vec{E}}{\partial t} \quad \Longleftrightarrow \quad \Delta \vec{E} - \omega^2 \mu\varepsilon \vec{E} = j\omega\mu\sigma \vec{E} \quad \Longleftrightarrow \quad \Delta \vec{E} = \gamma^2 \vec{E} \quad (6.2.4)$$

$$\Delta \vec{H} - \mu\varepsilon \frac{\partial^2 \vec{H}}{\partial t^2} = -\mu\sigma \frac{\partial \vec{H}}{\partial t} \quad \Longleftrightarrow \quad \Delta \vec{H} - \omega^2 \mu\varepsilon \vec{H} = j\omega\mu\sigma \vec{H} \quad \Longleftrightarrow \quad \Delta \vec{H} = \gamma^2 \vec{H} \quad (6.2.5)$$

où

- . ω est la pulsation de l'onde.
- . ε est la permittivité du milieu.
- . μ est la perméabilité du milieu.
- . σ est la conductivité électrique du milieu.
- . β et γ sont les constantes de propagation d'un milieu sans pertes, resp. avec pertes.

7. Variation temporelle de la forme $e^{j\omega t}$.

8. $\frac{\partial}{\partial t} \Leftrightarrow j\omega$ et $\frac{\partial^2}{\partial t^2} \Leftrightarrow (j\omega)^2 = -\omega^2$.

Le principal paramètre caractérisant ces équations est la constante de propagation γ ou β si on considère ou non des pertes dans le milieu. Cette constante relie la pulsation d'une onde à la célérité c , c'est-à-dire la vitesse de propagation de l'onde dans le milieu définie par $c = 1/\sqrt{\mu\epsilon}$. De plus, elles permettent de déterminer la relation de dispersion qui caractérise la propagation dans un milieu.

6.2.3 Solutions des équations de propagation des ondes

Les solutions des équations de propagation permettent de décrire l'évolution d'une onde (ou d'un front d'onde) en amplitude et en phase au cours du temps, et dépendent de la dimension spatiale du modèle considéré (1D, 2D ou 3D). Il existe donc différents types d'ondes qui permettent de construire des modèles de propagation adaptés aux dimensions du problème à modéliser, *cf.* Fig. 6.4.

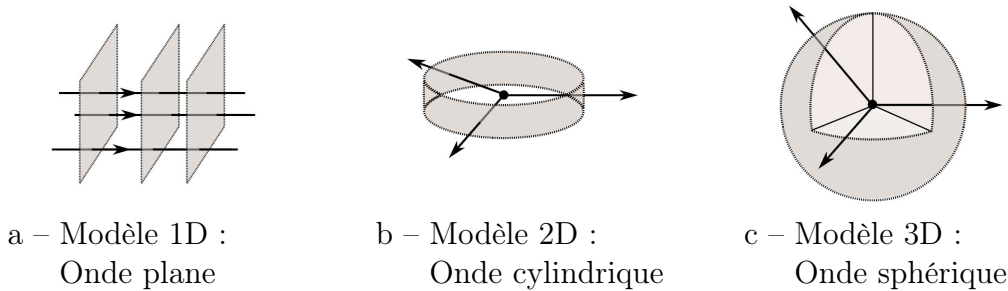


FIGURE 6.4 – Type de front d'onde en fonction de la dimension spatiale du modèle.

L'onde plane

Pour une onde plane, la solution canonique s'exprime :

$$\vec{E}(\vec{r}, t) = E_0 e^{j(\omega t - \vec{k}\vec{r})} \quad (6.2.6)$$

Le modèle de l'onde plane est un concept issu de la physique de la propagation des ondes. C'est un modèle relativement simple à utiliser qui donne une bonne approximation d'une onde se trouvant en zone de champ lointain, c'est-à-dire loin de la source. Ce type d'onde a la particularité de ne pas être atténuée au cours de sa propagation et d'avoir des fronts d'onde plans infinis, perpendiculaires à la direction de propagation.

Aussi, ce modèle permet de valider assez simplement un certain nombre de propriétés.

L'onde cylindrique

Pour une onde cylindrique, la solution canonique s'exprime :

$$\vec{E}(\vec{r}, t) \simeq \frac{E_0}{\sqrt{r}} e^{j(\omega t - \vec{k}\vec{r})} \quad (6.2.7)$$

Une onde cylindrique est une onde dont les fronts d'onde sont cylindriques. Ce modèle est assez peu utilisé en électromagnétisme car une onde électromagnétique se propage généralement dans un volume, c'est-à-dire de manière sphérique. On préfère souvent parler

d'onde sphérique. Cependant dans le cas d'un modèle bidimensionnel, on peut être amené à travailler avec ce type d'onde.

A contrario des ondes planes, le champ électromagnétique d'une onde cylindrique s'atténue au fur et à mesure de sa propagation et décroît en fonction de la distance en $\frac{1}{\sqrt{r}}$.

L'onde sphérique

Pour une onde sphérique, la solution canonique s'exprime :

$$\vec{E}(\vec{r}, t) = \frac{E_0}{r} e^{j(\omega t - k\vec{r})} \quad (6.2.8)$$

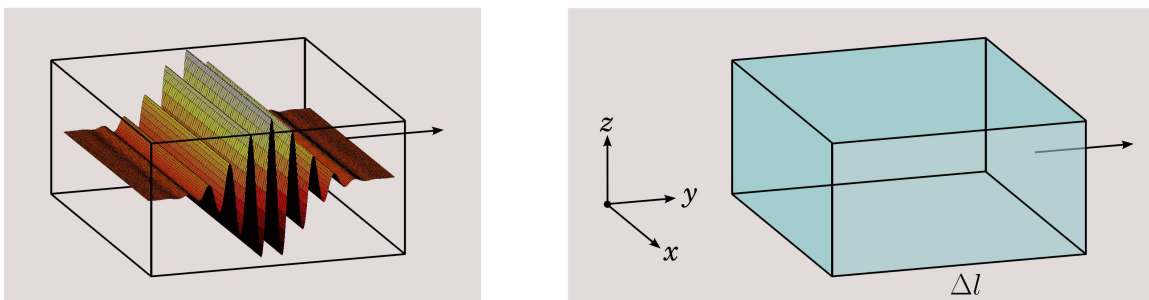
Sur le même principe que les ondes cylindriques, une onde sphérique est une onde dont les fronts d'onde sont sphériques. Le modèle de l'onde sphérique est le modèle le plus général pour modéliser une onde électromagnétique. Cependant, pour simplifier les modèles, on se place souvent loin de la source afin de pouvoir approcher localement cette onde par une onde plane.

Le champ électromagnétique d'une telle onde s'atténue plus rapidement que celle d'une onde cylindrique puisque l'énergie est répartie sur une sphère et décroît en $\frac{1}{r}$.

6.2.4 Modèle 1D

La solution de l'équation de propagation 1D est une onde plane. Cette onde se propage suivant une seule direction de propagation et possède des fronts d'onde plans infinis. De plus, elle ne s'atténue pas.

Le modèle du paquet d'onde impose que l'onde soit finie, c'est-à-dire qu'elle ait un début et une fin. Les fronts d'onde peuvent alors être définis par deux plans séparés d'une distance Δl correspondant à l'extension spatiale, ce qui est équivalent⁹ à une certaine durée temporelle Δt , suivant la direction de propagation.



a – Paquet d'onde plane.

b – Représentation géométrique.

FIGURE 6.5 – Modèle géométrique 1D d'un paquet d'onde plane.

Dans ce contexte, l'onde plane est modélisée par un objet de type boîte, caractérisé principalement par sa longueur Δl suivant l'axe de propagation, *cf.* Fig. 6.5. Les dimensions suivant les autres axes sont arbitraires. En effet, les fronts d'onde plans sont par

9. La dimension spatiale est reliée à la durée temporelle par la relation : $\Delta l = c \Delta t$.

nature infinis et il convient de définir une limite à ces plans. On les choisit du même ordre de grandeur que la dimension Δl de l'entité. Dans le modèle 1D, nous nous intéressons uniquement à ce qui se passe suivant l'axe de propagation. Les autres dimensions n'ont pas de raison d'être si ce n'est de pouvoir visualiser les entités dans un environnement virtuel 3D.

Ce modèle permet de tenir compte des phénomènes de réflexion et réfraction sous incidence normale.

6.2.5 Modèle 2D

La solution de l'équation de propagation 2D est une onde cylindrique. Cette onde se propage dans un plan et possède des fronts d'onde cylindriques. Contrairement aux ondes planes, celles-ci s'atténuent au cours de la propagation en $\frac{1}{\sqrt{r}}$, où r est la distance parcourue par l'onde.

Dans ce contexte, les fronts d'onde peuvent alors être modélisés par un anneau ou une portion d'anneau, dont la géométrie est définie par un ensemble de paramètres, *cf.* Fig. 6.6 :

- . r_1 est le rayon inférieur.
- . r_2 est le rayon supérieur.
- . θ_1 est l'angle inférieur.
- . θ_2 est l'angle supérieur.
- . θ est l'angle d'ouverture.
- . Δl est l'extension spatiale du front d'onde dans la direction radiale.

La hauteur de l'anneau importe peu puisque nous considérons dans le modèle 2D uniquement les champs dans le plan de propagation. Cette hauteur peut être fixée arbitrairement. Par convention, elle est de l'ordre de grandeur de la dimension Δl de l'entité pour faciliter la visualisation dans l'environnement virtuel 3D.

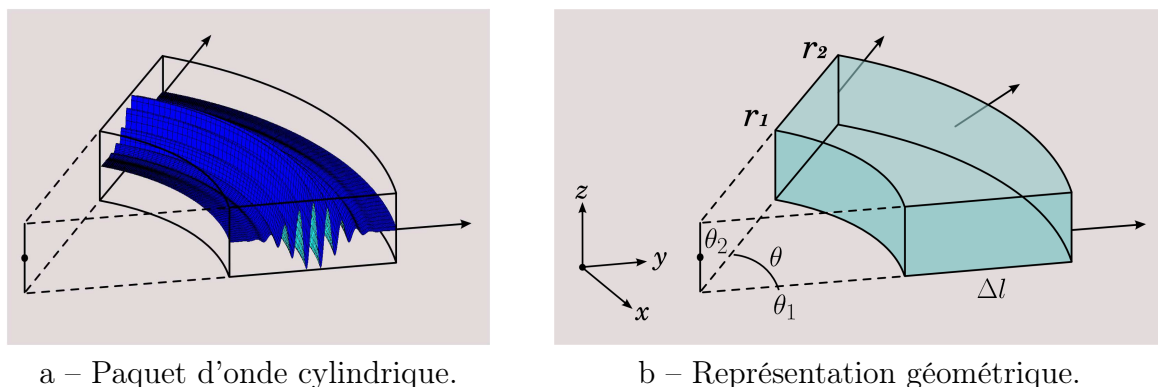


FIGURE 6.6 – Modèle géométrique d'un paquet d'onde cylindrique.

Le modèle de l'onde cylindrique suffit à décrire les interactions des phénomènes électromagnétiques avec des objets dont la géométrie est simple (polygones réguliers, parallélépipèdes rectangles). Ce modèle permet de tenir compte des phénomènes de réflexion et réfraction sous incidence quelconque et aussi de la diffraction aux coins des objets.

En revanche tenir compte d'objets plus complexes (objets courbes, cônes, . . .) pourrait nécessiter des traitements plus lourds au niveau des interactions et il serait alors plus simple de travailler avec des fronts d'onde plans 2D, *cf.* Fig. 6.7. Cependant la nature de l'environnement 2D impose que ces fronts d'onde plans possèdent certaines particularités des fronts d'onde cylindriques. Ils doivent notamment :

- s'atténuer au cours de la propagation.
- s'élargir dans la direction transverse à la direction de propagation pour compenser et tenir compte de l'élargissement d'une onde cylindrique.
- avoir un profil transverse tronqué mais sans rupture brutale du champ, similaire à celui d'un profil gaussien.

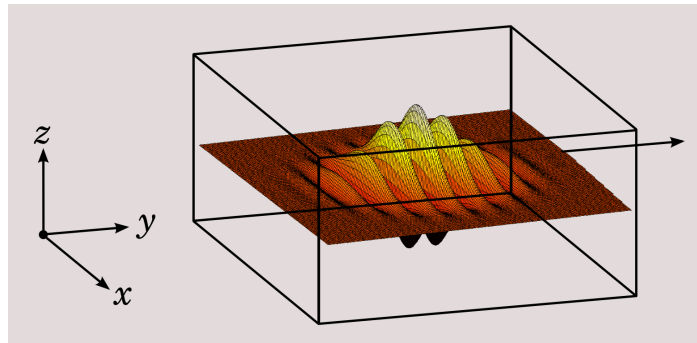


FIGURE 6.7 – Modèle géométrique d'un paquet d'onde plane 2D.

La construction d'un front d'onde plan 2D repose sur certaines hypothèses. En effet, un tel front d'onde est une dégénérescence¹⁰, une simplification, d'un front d'onde cylindrique dont l'angle d'ouverture θ est suffisamment petit et le rayon de courbure moyen¹¹ r est suffisamment grand pour être assimilé « localement » à un front d'onde plan.

De cette manière il est tout à fait possible de faire cohabiter différents types d'ondes électromagnétiques afin d'enrichir le modèle et trouver des solutions à la complexité de certaines interactions.

6.2.6 Modèle 3D

Ce modèle n'a pas été développé dans la suite de ces travaux. Cependant, nous pouvons tout de même faire quelques remarques.

De manière analogue aux modèles précédents et plus particulièrement par généralisation du modèle 2D, on pourrait envisager un modèle électromagnétique 3D. Celui-ci serait basé sur une représentation sphérique (ou portion de sphère) de l'entité, *cf.* Fig. 6.8. De plus, aux phénomènes de diffraction sur les coins des objets il faudrait ajouter les phénomènes de diffraction aux arêtes.

Pour les mêmes considérations que le modèle 2D, on pourrait également envisager la construction d'un front d'onde plan 3D voire d'autres types d'entités plus ou moins

10. Au sens mathématique du terme.

11. On définit le rayon de courbure moyen r tel que $r = \frac{r_1+r_2}{2}$.

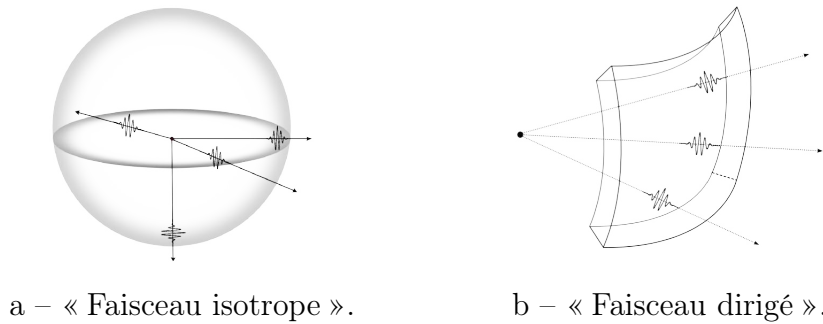


FIGURE 6.8 – Représentation d'un paquet d'onde sphérique.

exotiques. La cohabitation de modèles est un des atouts des systèmes multi-agents et l'ajout d'un phénomène n'a pas à remettre en cause l'ensemble du modèle.

6.2.7 Perception et autonomie des ondes électromagnétiques

La perception d'une entité *onde électromagnétique* est sa capacité à percevoir les différents milieux (objets) de l'environnement. Elle possède par conséquent une zone de perception — que nous appellerons zone de champ actif — plus ou moins limitée qui lui permet de détecter et localiser d'une part la présence ou non d'objets sur sa trajectoire et d'autre part de décider de l'action à mener suite à une interaction avec un objet. Cette zone de champ actif correspond au *champ de vision* (zone de visibilité) d'une entité. Pour le modèle 1D, cette zone est restreinte par le vecteur directeur de l'entité. Dans le cas du modèle 2D, elle est conditionnée par l'ouverture angulaire directrice du front d'onde.

L'ensemble des capacités d'une entité réside dans des méthodes et des activités qui lui sont propres, cf. Fig. 6.9, et lui confèrent son autonomie de perception, d'action et de décision.

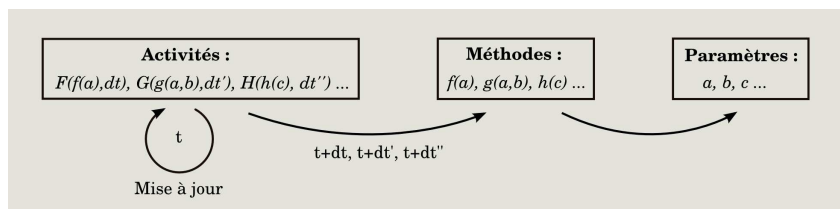


FIGURE 6.9 – Accès des activités et méthodes d'une entité à ses paramètres.

Les paramètres

Les paramètres d'une entité sont les variables qui caractérisent son état et ses propriétés, comme par exemple sa vitesse et sa direction de propagation, ... mais aussi la description de son « contenu électromagnétique ». Une entité est définie par un paquet d'onde et contient un signal caractérisé par un ensemble de paramètres tels que : une amplitude E_0 , une fréquence f_0 , une phase φ_0 , ... cf. Section 6.1.4.

$$\text{paramètres : } x, y, z, \dots \tag{6.2.9}$$

Les méthodes

Une méthode est une fonction qui peut être appelée par l'entité elle-même ou un autre processus pour modifier certains de ses paramètres internes, comme par exemple modifier sa vitesse ou sa direction de propagation, créer/supprimer une entité. Ces méthodes caractérisent les savoir-faire de l'entité.

$$\text{méthodes} : f_1(x), f_2(x, y), f_3(f_1(x), y, z), \dots \quad (6.2.10)$$

Les activités

Une activité est aussi une fonction mais elle possède en plus une relation avec le temps. C'est donc un processus qui a une certaine durée et qui se déclenche à intervalle de temps plus ou moins régulier. De ce fait elle a besoin d'être mise à jour régulièrement. Une activité peut appeler une méthode pour modifier certaines propriétés de l'entité comme par exemple détecter si il y a une « collision » entre une entité et un objet, auquel cas cette entité devra interagir avec cet objet grâce à ses savoir-faire. L'activité la plus courante est l'activité de déplacement qui fait se propager une entité dans l'environnement.

$$\text{activités} : F_1(\Delta t, f_1(x), y), F_2(\Delta t, f_1(x), f_2(x, y), z), \dots \quad (6.2.11)$$

D'une manière générale, une entité est donc un ensemble structuré caractérisé par : la structure paramétrique, la structure des savoir-faire (les méthodes) et la structure des activités. Ce sont les briques élémentaires permettant de construire un modèle dynamique d'un système complexe.

Nos entités *ondes électromagnétiques* sont capables, outre le fait de se propager, de créer de nouvelles entités lors des interactions ; voire de se supprimer si elles sortent de leur domaine de validité, fixé par une condition du type :

- seuil \implies si le contenu (amplitude) de l'entité est inférieur à un certain seuil.
- interaction \implies si l'entité a subi un certain nombre d'interactions.
- spatiale \implies si l'entité sort de l'environnement (condition obligatoire).

Ceci permet de limiter le nombre d'entités au sein de l'environnement de simulation.

6.3 Les milieux électromagnétiques

Les milieux électromagnétiques sont des entités au même titre que les ondes électromagnétiques. En effet, une entité est par définition un agent susceptible de se mouvoir, de percevoir et d'interagir avec d'autres types d'entités.

Ces entités sont très simples en comparaison des ondes électromagnétiques. En effet, dans notre modèle ces objets sont inertes (inanimés) ; ils n'ont pas de but particulier, ne se déplacent pas et sont dépourvus de perception. Cependant, elles permettent aux entités *ondes électromagnétiques* d'accéder à certains de leurs paramètres tels que la permittivité par exemple afin que celles-ci puissent adapter leur vitesse de propagation dans le milieu.

Ces milieux sont les supports de la propagation des ondes tels que les milieux diélectriques ou conducteurs. Ce sont principalement des objets constitués de matériaux¹² diélectriques ou conducteurs, avec ou sans pertes. Ils sont caractérisés par un ensemble de paramètres et propriétés qui sont très bien définis dans le domaine fréquentiel. Néanmoins, le traitement de matériaux avec ou sans pertes ne s'effectue pas tout à fait de la même façon et la distinction faite entre **paquet d'onde** (monoporteuse) et **paquet d'ondes** (multiporteuse) va prendre toute son importance et tout son sens.

Un milieu diélectrique est caractérisé principalement par sa permittivité relative ε_r et sa perméabilité relative μ_r tandis qu'un milieu conducteur est caractérisé principalement par sa conductivité σ . Dans la suite, les milieux sont considérés non-magnétiques ($\mu_r = 1$). La permittivité d'un matériau s'exprime alors par $\mu = \mu_0\mu_r = \mu_0$. Aussi, nos milieux ne demandent pas de considérer des conditions aux limites particulières pour simuler l'espace libre. Le modèle est naturellement ouvert.

6.3.1 Les milieux sans pertes

Dans le vide ($\varepsilon_r = 1$) ou dans un milieu matériel diélectrique quelconque ($\varepsilon_r \geq 1$) et sans pertes, la permittivité du milieu est purement réelle et s'écrit :

$$\varepsilon = \varepsilon_0\varepsilon_r \tag{6.3.1}$$

où ε_0 est la permittivité du vide et ε_r la permittivité relative du milieu.

Dans un milieu matériel conducteur sans pertes, la conductivité σ est infinie ($\sigma \rightarrow \infty$).

Le traitement de tels milieux est relativement simple. Un matériau de ce type est caractérisé par un ensemble de paramètres qui ne dépendent pas de la fréquence d'excitation. L'utilisation du modèle du paquet d'onde semble donc suffisant pour caractériser ce type de matériau.

6.3.2 Les milieux à pertes

Dans un milieu matériel diélectrique ou conducteur à pertes, la relation précédente (6.3.1) n'est plus valable. Nous devons alors considérer la permittivité comme une grandeur complexe qui dépend de la fréquence (ou de la pulsation) et tenir compte des pertes diélectriques définies par la tangente de pertes ($\tan \delta \in \mathbb{R}^+$) et des pertes conductrices définies par la conductivité ($\sigma \in \mathbb{R}^+$).

D'après les équations de propagation dans un milieu à pertes, *cf.* Eqs. (6.2.4) et (6.2.5) de la Section 6.2.2, la permittivité peut alors s'exprimer d'une manière générale par la relation suivante :

$$\underline{\varepsilon} = \varepsilon(\omega) = \varepsilon' - j\varepsilon'' - j\frac{\sigma}{\omega} \tag{6.3.2}$$

$$= \varepsilon' - j\frac{\omega\varepsilon'' + \sigma}{\omega} \tag{6.3.3}$$

$$= \varepsilon'(1 - j \tan \delta) \tag{6.3.4}$$

12. À l'exception des milieux d'air (vide).

où

- . ε' est la permittivité du milieu.
- . ε'' est un terme lié aux pertes diélectriques dans le milieu.
- . σ est la conductivité électrique dans le milieu.
- . ω est la pulsation de l'onde dans le milieu.

En considérant des pertes diélectrique et conductrice, on définit la tangente de pertes à une certaine fréquence (pulsation) :

$$\tan \delta = \frac{\omega \varepsilon'' + \sigma}{\omega \varepsilon'} \quad (6.3.5)$$

D'une façon plus générale, on écrira :

$$\underline{\varepsilon} = \varepsilon_{eff}(\omega) = \varepsilon' - j\varepsilon'' \quad (6.3.6)$$

avec

$$\varepsilon' = \varepsilon_0 \varepsilon_r \quad (6.3.7)$$

$$\varepsilon'' = \varepsilon_0 \varepsilon_r \tan \delta \quad (6.3.8)$$

La partie réelle (ε') de $\underline{\varepsilon}$ rend compte de la propagation dans le milieu tandis que la partie imaginaire (ε'') rend compte des pertes dans le milieu. Pour de très bons isolants ($\sigma \simeq 0$), ce paramètre ε'' varie peu en fonction de la fréquence.

Le traitement de tels milieux est un peu plus complexe. En effet, ce type de matériau est caractérisé par un ensemble de paramètres qui dépendent de la fréquence d'excitation. Il n'est donc plus envisageable d'utiliser le modèle du paquet d'onde mais plutôt celui du paquet d'ondes.

L'utilisation d'un paquet d'onde donnerait une réponse électromagnétique correcte mais uniquement à sa fréquence propre. En revanche l'utilisation d'un paquet d'ondes doit permettre d'obtenir une réponse électromagnétique correcte sur l'ensemble de la bande de fréquences composant son spectre.

6.3.3 Relation de dispersion

D'après les équations de propagation *cf.* Eqs. (6.2.4) et (6.2.5) de la Section 6.2.2, si on considère un milieu général à pertes, avec une tangente de pertes $\tan \delta$ *cf.* Eq. (6.3.5), la relation de dispersion qui caractérise un milieu de propagation s'exprime :

$$\gamma = \alpha + j\beta = j\omega\sqrt{\mu\varepsilon'(1 - j \tan \delta)} \quad (6.3.9)$$

où α est la constante d'atténuation et β la constante de propagation¹³ et s'expriment :

$$\alpha = \Re(\gamma) = \omega\sqrt{\mu\varepsilon} \left\{ \frac{1}{2} \left[\sqrt{1 + \tan^2 \delta} - 1 \right] \right\}^{\frac{1}{2}} \quad (\text{Np/m}) \quad (6.3.10)$$

$$\beta = \Im(\gamma) = \omega\sqrt{\mu\varepsilon} \left\{ \frac{1}{2} \left[\sqrt{1 + \tan^2 \delta} + 1 \right] \right\}^{\frac{1}{2}} \quad (\text{rad/m}) \quad (6.3.11)$$

13. Dans la littérature, la constante de propagation β est souvent remplacée par k .

On rencontre aussi dans la littérature $\gamma = \alpha + j\beta = j\underline{k}$ où $\underline{k} = k' - jk''$. On a alors la correspondance $k' = \beta$ et $k'' = \alpha$.

Dans un milieu non-absorbant, une onde plane se propage sans atténuation avec une vitesse de phase qui dépend de la fréquence. Le fait d'avoir un milieu absorbant se traduit par le fait que la permittivité du milieu devient complexe $\underline{\varepsilon} = \varepsilon(\omega)$ ainsi que l'ensemble des paramètres qui lui sont associés. Le champ électromagnétique d'une onde plane peut alors s'écrire sous la forme :

$$e^{-\gamma z} = e^{-\alpha z} e^{-j\beta z} \quad \text{ou} \quad e^{-j\underline{k}z} = e^{-k'z} e^{-jk''z} \quad (6.3.12)$$

L'onde s'atténue au fur et à mesure de sa propagation dans le milieu.

La constante d'atténuation α s'exprime souvent en décibel par mètre (dB/m). La conversion entre Np/m et dB/m s'obtient de la façon suivante :

$$\text{dB} = 20 \log_{10}(e^{-\alpha z}) = 20 (-\alpha z) \log_{10}(e) \simeq -8.68 (\alpha z) \quad (6.3.13)$$

d'où

$$|\alpha \text{ (Np/m)}| = \frac{1}{20 \log_{10}(e)} |\alpha \text{ (dB/m)}| = \frac{1}{8.68} |\alpha \text{ (dB/m)}| \quad (6.3.14)$$

6.3.4 Vitesse de phase

Les équations de propagation permettent d'introduire une vitesse de phase v_φ :

$$v_\varphi = \frac{1}{\sqrt{\varepsilon\mu}} = \frac{c_0}{\sqrt{\varepsilon_r\mu_r}} \quad (6.3.15)$$

qui dans le cas de milieux non-magnétiques ($\mu_r = 1$) s'exprime :

$$v_\varphi = \frac{1}{\sqrt{\varepsilon\mu}} = \frac{c_0}{\sqrt{\varepsilon_r}} = \frac{c_0}{n} \quad (6.3.16)$$

On appelle $n = \sqrt{\varepsilon_r}$, l'indice de réfraction.

Cette vitesse correspond à la célérité de l'onde dans le milieu. Celle-ci n'est pas toujours constante et peut dépendre de la fréquence (pulsation). Le phénomène de propagation est dit dispersif si la vitesse de phase dépend de la pulsation : $v_\varphi(\omega)$. Dans ce cas, la relation de dispersion n'est plus linéaire :

$$v_\varphi(\omega) = \frac{\omega}{\beta(\omega)} \quad (6.3.17)$$

Une onde réelle n'est pas purement monochromatique mais contient un spectre lié à la finitude — à la fois spatiale et temporelle — du signal et possède donc une certaine représentation spectrale limitée sur une bande de fréquence, cf. Section 6.1.2. On voit bien que dans ce cas, chaque composante spectrale du signal se propage à sa propre vitesse de phase $v_\varphi(\omega)$ et on observe un étalement du signal au fur et à mesure que l'onde se propage.

6.3.5 Impédance complexe du milieu

Une autre caractéristique des propriétés d'un milieu est l'impédance intrinsèque. Lors de l'interaction d'une onde avec un milieu dont les propriétés sont différentes de celui dans lequel elle se propage, il est parfois plus aisé de travailler avec l'impédance d'onde — aussi appelée impédance intrinsèque du milieu — pour définir les échanges d'énergie entre milieux. Cette impédance permet d'exprimer facilement les coefficients de réflexion et transmission à l'interface entre deux milieux. Elle est définie de manière générale par la relation suivante :

$$\underline{Z} = \eta(\omega) = j \frac{\omega \mu}{\gamma} \quad (6.3.18)$$

où

- . γ est la constante de propagation.
- . μ est la perméabilité du milieu.
- . ω est la pulsation de l'onde dans le milieu.

Notons que la notion d'impédance d'onde est un concept de « localité », valable uniquement dans le cas d'une onde plane, c'est-à-dire en zone de champ lointain.

6.3.6 Indice complexe du milieu

On définit l'indice complexe \underline{n} du milieu de propagation par :

$$\underline{n} = n' + jn'' = \underline{k} \frac{c}{\omega} = \gamma \frac{c}{\omega} \quad (6.3.19)$$

où

- . n' est l'indice de dispersion (également appelé indice de réfraction).
- . n'' est l'indice d'absorption.

Ces indices n' et n'' s'expriment par :

$$n' = k' \frac{c}{\omega} = \beta \frac{c}{\omega} \quad (6.3.20)$$

$$n'' = k'' \frac{c}{\omega} = \alpha \frac{c}{\omega} \quad (6.3.21)$$

On a $n' = c/v_\varphi$. Si $n'' = 0$, on dit que le milieu est transparent (pas de pertes).

On peut aussi définir cet indice complexe à partir de la permittivité relative du milieu :

$$\underline{n} = n(\omega) = \sqrt{\varepsilon_r(\omega)} \quad \text{où} \quad \varepsilon_r(\omega) = \frac{\varepsilon(\omega)}{\varepsilon_0} \quad (6.3.22)$$

6.4 Modèles géométriques des milieux électromagnétiques

Les milieux (ou objets) de l'environnement sont les milieux avec lesquels une onde électromagnétique peut interagir. Ils sont délimités par des boîtes¹⁴ dont on considère que les faces sont planes c'est-à-dire sans rugosité. Ces objets pourraient être de formes plus exotiques (polygones, polyèdres, cylindres, *etc.*) mais cela nécessiterait un développement plus complexe quant aux possibilités d'interactions entre eux et une onde électromagnétique d'où le choix de se limiter à des formes simples (pour le moment). Ces objets sont constitués de matériaux diélectriques ou conducteurs et sont caractérisés par leur permittivité ε , leur perméabilité μ et leur conductivité σ . De plus, dans le cas de matériaux à pertes, nous devons tenir compte de la tangente de pertes $\tan \delta$ et de la permittivité complexe $\underline{\varepsilon}$ définies précédemment.

Nous distinguons principalement deux types d'objets :

- les boîtes (et les lames)
- les cavités

6.4.1 Les boîtes et les lames

Les boîtes et les lames sont des objets constitués d'un seul matériau, *cf.* Fig. 6.10. Plus précisément, la lame a une de ses dimensions négligeable par rapport à une boîte.

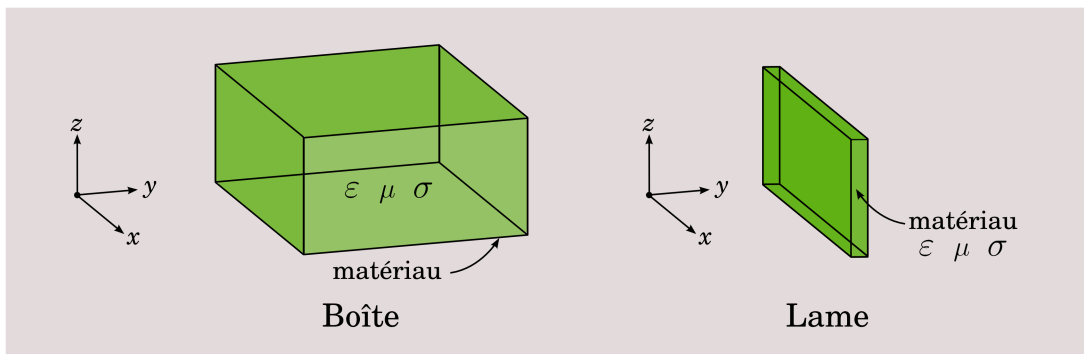


FIGURE 6.10 – Modèle géométrique d'une boîte (ou d'une lame).

6.4.2 Les cavités

Les cavités sont des objets formés d'une paroi extérieure et d'une paroi intérieure qu'il faut dimensionner. Chacune de ces parois est constituée d'un matériau différent, *cf.* Fig. 6.11. Il en existe deux types :

- des cavités métalliques.
- des cavités « diélectriques ».

14. Boîtes de la forme d'un parallélépipède rectangle.

Les cavités métalliques sont des cavités dont les parois extérieures sont faites d'un matériau conducteur et le milieu intérieur est rempli d'air ou d'un matériau diélectrique. Ce sont des cavités résonantes.

Les cavités diélectriques sont constituées de parois extérieures faites d'un matériau diélectrique et le milieu intérieur est rempli d'air.

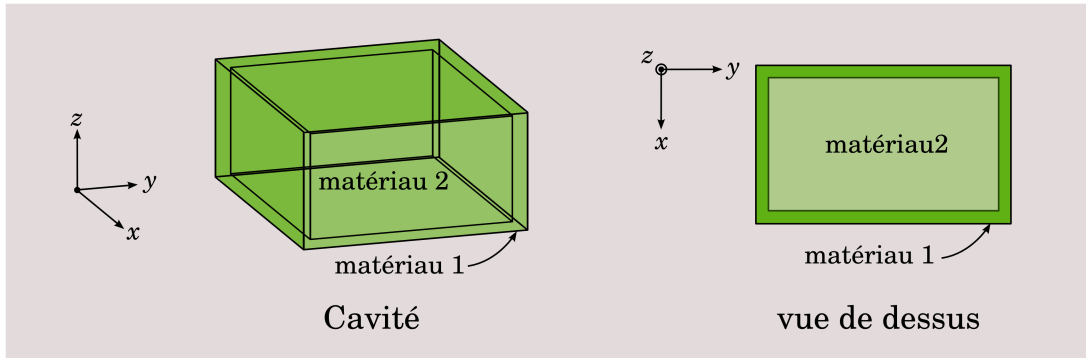


FIGURE 6.11 – Modèle géométrique d'une cavité.

6.4.3 L'environnement

L'environnement est le champ expérimental de la simulation. Il délimite le domaine d'étude des interactions électromagnétiques et fixe les limites d'un monde virtuel, reconstitution (modèle) d'un monde réel. Dans ce cadre, il représente ce qu'on appelle l'espace libre. C'est un milieu d'air (vide) caractérisé par la permittivité du vide ϵ_0 et la perméabilité du vide μ_0 . Cet environnement est modélisé par une boîte et est constitué par défaut d'un milieu d'air, cf. Fig. 6.12.

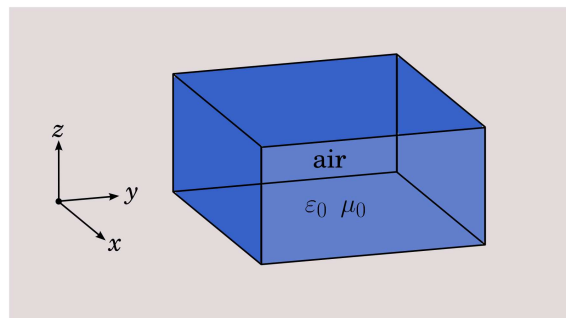


FIGURE 6.12 – Modèle géométrique de l'environnement.

Notre environnement est un milieu borné, peuplé par l'ensemble des entités, cf. Fig. 6.13. Il est le « support » des interactions qui peuvent avoir lieu et constitue de ce fait la scène de la simulation. Il délimite par ses frontières le domaine de validité et donc d'existence des entités et des interactions. Tout ce qui se situe en dehors de cet environnement est inexistant à la simulation.

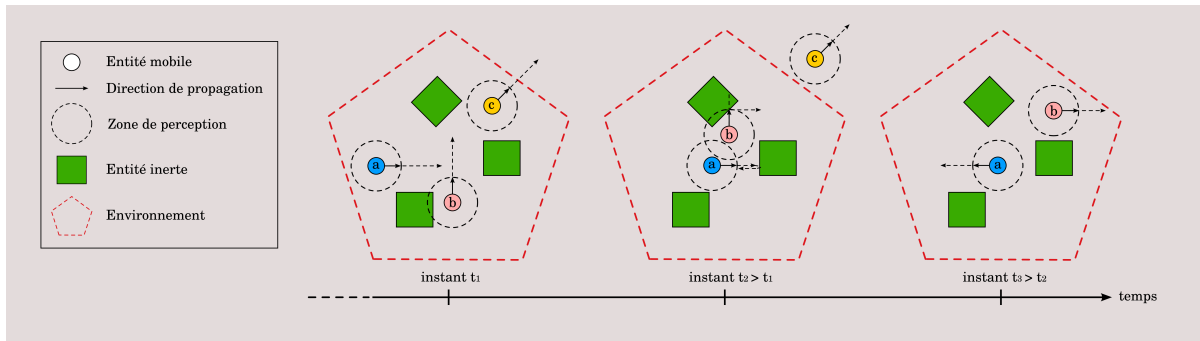


FIGURE 6.13 – Illustration d’un environnement multi-agents.

Un environnement est peuplé par des agents (entités). Ici nous avons deux types d’entités, certaines sont mobiles et d’autres sont inertes.

Celles qui sont inertes n’ont aucune capacité particulière. En revanche, celles qui sont mobiles (a, b, c) peuvent se déplacer suivant une direction et sont capables de se réfléchir sur un obstacle. Pour cela, elles sont dotées d’une zone de perception afin de détecter un éventuel obstacle sur leur trajectoire et pouvoir ainsi interagir avec celui-ci en adaptant leur trajectoire. Elles sont de plus transparentes les unes aux autres et ne peuvent donc pas interagir entre-elles. Si une entité sort de l’environnement c, elle est supprimée et par conséquent n’existe plus.

6.5 Les instruments de « mesure »

Nous avons développé plusieurs instruments de « mesure » pour lire le champ électromagnétique en certains points ou régions de l’espace :

- les cellules de lecture.
- les cartes de champ.

Aussi, il nous faut définir de la même façon que pour les autres entités, la forme d’une cellule de lecture. Celle-ci est définie par un objet de forme cubique, cf. Fig. 6.14. Une carte de champ n’est autre qu’un ensemble de cellules de lecture dont l’affichage diffère.

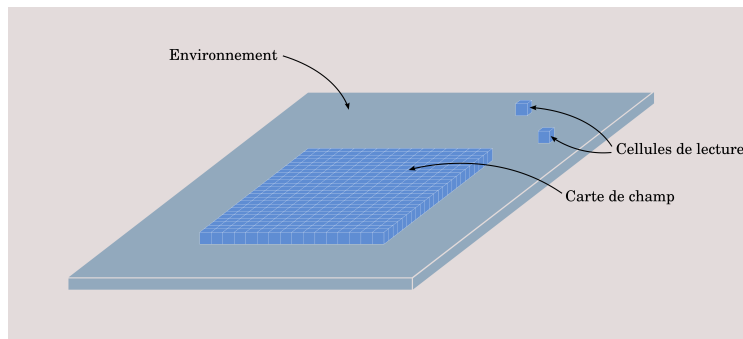


FIGURE 6.14 – Cellules de lecture et carte de champ.

L’ensemble des éléments constitutifs de notre modèle énoncé électromagnétique vient de prendre forme. Il s’agit maintenant de lui donner « vie » par les différentes interactions qui peuvent avoir lieu, principalement entre les ondes et les milieux électromagnétiques.