



HAL
open science

Morphing appliqué aux simulations numériques dans le cadre de la recherche en sismologie et de la protection des habitats et édifices

Ronald Aznavourian

► **To cite this version:**

Ronald Aznavourian. Morphing appliqué aux simulations numériques dans le cadre de la recherche en sismologie et de la protection des habitats et édifices. Vision par ordinateur et reconnaissance de formes [cs.CV]. 2016. dumas-01538405

HAL Id: dumas-01538405

<https://dumas.ccsd.cnrs.fr/dumas-01538405>

Submitted on 13 Jun 2017

HAL is a multi-disciplinary open access archive for the deposit and dissemination of scientific research documents, whether they are published or not. The documents may come from teaching and research institutions in France or abroad, or from public or private research centers.

L'archive ouverte pluridisciplinaire **HAL**, est destinée au dépôt et à la diffusion de documents scientifiques de niveau recherche, publiés ou non, émanant des établissements d'enseignement et de recherche français ou étrangers, des laboratoires publics ou privés.



MÉMOIRE

présenté en vue d'obtenir

le **DIPLÔME D'INGÉNIEUR CNAM**

SPÉCIALITÉ : Informatique

OPTION : Réseaux Systèmes Multimédias

par

Ronald Aznavourian

Morphing appliqué aux simulations numériques dans le cadre de la recherche en sismologie et de la protection des habitats et édifices.

Soutenu le 08 janvier 2016



JURY

PRÉSIDENT : M. Yves LALOUM Professeur, C.N.A.M. Paris

MEMBRES : M. Bastien PESCE Enseignant, C.N.A.M. Aix-en-Provence

M. Noël QUESSADA Enseignant, C.N.A.M. Aix-en-Provence

M. Sébastien GUENNEAU Directeur de Recherche, Institut Fresnel

M. Jean-Louis BRUNEL Ingénieur de Recherche, Rectorat Aix-Marseille

Table des matières

Remerciements	3
Liste des abréviations	4
I. Introduction	5
I.1. Quelques éléments de contexte	5
I.2. Objectifs	5
II. Problématique et travaux antérieurs	7
II.1. Les métamatériaux et l'optique (définitions)	7
II.2. État de l'art	9
II.3. De l'optique à la sismique : une approche totalement nouvelle	13
II.4. Du numérique à l'expérimental	15
II.5. Contraintes économiques et délais	16
III. Solutions proposées	17
III.1. Le morphing, son fonctionnement et sa pertinence dans le contexte défini	17
III.2. Les éléments finis et les différences finies en domaine temporel	26
III.3. Les trois types d'application du morphing aux simulations numériques	27
III.4. Réalisation	28
III.5. Mise en œuvre actuelle et future mise en œuvre	34
IV. Résultats et discussion	35
IV.1. Les résultats obtenus	35
IV.2. Validations des résultats	39
IV.3. Limites de la méthode du « morphing »	43
IV.4. Intérêts de la méthode du « morphing » et exploitation des résultats	47
V. Conclusion	48
V.1. Applications industrielles et intérêt économique	48
V.2. Industrialisation et coût de la méthode du « morphing »	49
V.3. Perspectives d'évolutions techniques et applicatives	50
Annexe I	52
Annexe II	87
Annexe III	89
Bibliographie	94
Liste des figures	95
Résumé	99

Remerciements

Je remercie le Dr Sébastien Guenneau pour m'avoir intégré dans son projet, ce qui m'a donné la possibilité de tester et de vérifier l'efficacité de l'idée que j'avais émise.

Je remercie le Pr Philippe Refregier, véritable expert en traitement de l'image, pour son aide salvatrice au moment crucial de devoir trouver une solution pour quantifier les taux d'erreurs.

Je remercie l'ensemble de l'équipe dans laquelle je travaille, et en particulier le Dr Younès Achaoui pour les « cours » de rattrapage en physique, ainsi que le Dr André Diatta, pur mathématicien, dont les connaissances en musique sont inversement proportionnelles à ses immenses connaissances en mathématiques. Notons qu'il s'imagine encore que Michael Jackson aurait une quelconque espèce de talent, ce qui montre à quel point ses connaissances en mathématiques sont incroyablement étendues.

Je remercie également les différents acteurs de la « Société d'Accélération du Transfert de Technologies » pour leurs compétences et l'indispensable aide qu'ils m'ont apportée pour le dépôt du brevet.

Enfin, je remercie aussi l'ensemble du corps enseignant du Conservatoire National des Arts & Métiers d'Aix-en-Provence, et en particulier M. Bastien Pesce ainsi que M. Jean-Louis Brunel pour m'avoir accompagné dans cette longue aventure jusqu'à ce mémoire.

Liste des abréviations

F.D.T.D. : « Finite Difference Time Domain », ou « Différences Finies en Domaine Temporel », méthode de calcul scientifique pour déterminer les amplitudes d'un signal sur chaque nœud du maillage. Plus exactement, l'amplitude d'un nœud à l'instant t_n est calculée en fonction des amplitudes des nœuds adjacents à l'instant t_{n-1} .

S.SIM. : « Structural SIMilarity », ou « SIMilarité Structurale », méthode de comparaison d'images fondée non seulement sur les couleurs (la « structure »), mais également sur la luminosité et le contraste. Cette méthode autorise une certaine tolérance dans la comparaison d'images.

S.A.T.T. : la Société d'Accélération du Transfert de Technologies est en charge de la valorisation des inventions issues de la recherche.

I. Introduction

I.1. Quelques éléments de contexte

Des fibres optiques aux nanotechnologies, nos homologues physiciens œuvrent en coulisse pour trouver des solutions techniques qui améliorent considérablement nos conditions de travail. De fait, il est bien normal qu'à son tour, la communauté des informaticiens rende plus confortable les conditions de travail des physiciens. Ainsi, par le développement de logiciels, ou de méthodes logiques de calcul, nous pouvons aider ces physiciens, et le projet que je vous présente devrait, j'espère, rentrer dans ce cadre.

En effet, le laboratoire de recherche qui m'accueille, l'Institut Fresnel, est, principalement, un laboratoire de recherche en optique. Sous l'égide des trois tutelles que sont : l'École Centrale Marseille, Aix-Marseille Université, et le Centre National de la Recherche Scientifique, l'Institut Fresnel se compose de douze équipes de chercheurs. Si chacune de ces équipes a ses thématiques propres, en revanche, elles ont toutes en commun de devoir réaliser des simulations numériques pour étayer leurs recherches, soit pour prédire certains phénomènes physiques, soit pour en expliquer d'autres.

L'équipe « Concept » dans laquelle je travaille est constituée de six chercheurs permanents, cinq doctorants, ainsi que trois chercheurs et deux ingénieurs (dont je fais partie) non permanents. Parmi ces six chercheurs permanents, je travaille avec le Dr Sébastien Guenneau dont la spécialité est la recherche sur les ondes sismiques et hydrodynamiques, et sur le moyen de se prémunir contre ces ondes.

I.2. Objectifs

Il est effectivement assez curieux d'effectuer des recherches sur les ondes sismiques dans un laboratoire focalisé principalement dans la recherche sur les ondes optiques, cela dit, la spécificité particulièrement novatrice des recherches du Dr Sébastien Guenneau est d'appliquer les principes de la physique des ondes optiques aux ondes sismiques, au moyen, en quelque sorte, d'un changement d'échelle.

Ces recherches ont pour objectif essentiel de protéger des séismes des bâtiments, des édifices, ou même des ensembles de bâtiments et d'édifices déjà existant, sans pour autant avoir à modifier quoi que ce soit sur ces constructions.

En gardant à l'esprit que ces recherches sont fondées sur les principes de la physique des ondes optiques, on comprend que le domaine d'application de ces recherches peut aller bien au-delà des ondes sismiques. Ainsi, les objectifs secondaires de ces recherches consistent à appliquer dans des domaines divers les principes fondamentaux de ces recherches. Par exemple, en optique, on pourra rendre invisible une zone dans laquelle on pourra placer un objet, ou une personne. Toujours sur le même principe, en hydrodynamique, on pourra préserver des plateformes pétrolières des remous tumultueux de la mer par temps agité.

Quels que soient les domaines d'applications, ces recherches nécessitent de nombreuses simulations numériques particulièrement gourmandes aussi bien en temps qu'en ressources informatiques, et à mon niveau, mon objectif est de réduire ces besoins tout en obtenant des résultats aussi proches que possible de ceux obtenus avec les méthodes utilisées actuellement.

II. Problématique et travaux antérieurs

II.1. Les métamatériaux et l'optique (définitions)

Découverts par le Pr John Pendry en 1999, les métamatériaux sont des milieux composites ayant des propriétés particulières qui n'existent pas à l'état naturel. Plus exactement, c'est la structuration bien particulière de la matière, généralement à l'échelle nanométrique (par exemple en combinant au moins deux matériaux aux propriétés physiques relativement contrastées), qui va donner lieu à des propriétés bien spécifiques aux matériaux ainsi créés. Par exemple, on pourrait considérer les vitraux dans les églises comme étant les premiers métamatériaux : l'assemblage bien particulier de différents morceaux de verre de formes et de couleurs différentes donnant à la lumière du jour la propriété de représenter un tableau...

Pour ce qui est de l'optique, mes anciens souvenirs de classe de terminale se limitent aux indices de réfraction, autrement dit, aux changements de direction des rayons lumineux selon les milieux qu'ils traversent, avec, pour calculer l'angle de réfraction, une équation du type :

$$n_1 \sin(\theta_1) = n_2 \sin(\theta_2).$$

Dans cette équation, n_1 et n_2 représentent les indices des milieux 1 et 2, et θ_1, θ_2 les angles que font les rayons incident et transmis par rapport à la normale à l'interface séparant ces deux milieux. Notons que, jusqu'à la découverte des métamatériaux, une lentille ne pouvait être convergente que si elle présentait une courbure convexe. Le Pr John Pendry, de l'Imperial College, à Londres, a bouleversé cette règle de la physique en créant une lentille plate (sans courbure) avec d'étonnantes propriétés, juste en structurant la matière d'une manière bien particulière.

Bien entendu, dans le développement de ses recherches, John Pendry ne s'est pas contenté de cette équation, d'une lentille plate ou de simples morceaux de vitraux : en 2006 il a proposé la première « cape d'invisibilité », à savoir, un métamatériau capable de courber les rayons optiques de sorte à ce qu'ils contournent un obstacle, lequel, de fait, devient invisible. La modification des propriétés des matériaux qu'il propose peut aller jusqu'à ce qui semble être

Morphing appliqué aux simulations numériques dans le cadre de la recherche en sismologie et de la protection des habitats et édifices.

une absurdité, comme, par exemple, un matériau de densité négative¹ ou encore un indice de réfraction négatif...

En réalité, ce qui ne nous a pas été enseigné en classe de terminale, c'est que la lumière est un rayonnement électromagnétique, c'est-à-dire, la résultante de deux composantes, l'une électrique, et l'autre, magnétique. La composante électrique ou « permittivité » se note sous la lettre grecque epsilon (« ϵ »), et la composante magnétique ou « perméabilité » se note sous la lettre grecque mu (« μ »). L'information essentielle qui nous manque pour comprendre qu'un indice de réfraction puisse être négatif, c'est l'équation suivante :

$$n = \sqrt{\epsilon \cdot \mu} .$$

Là encore on peut se demander comment une racine carrée pourrait être négative, mais à nouveau, les leçons de classe de terminale, notamment sur les nombres complexes, laissent entendre qu'un produit dans la partie « imaginaire », ou plus exactement, un multiple de « i^2 », aurait nécessairement une racine carrée négative.

Ces principes de l'optique sont régis par les équations de Maxwell, alors que les principes physiques de la sismique (ou « élastodynamique ») sont régis par les équations de Navier. En comparant ces deux types d'équations, on trouve une certaine analogie.

Optique (ou électromagnétisme)

Électrostatique

$$\vec{\nabla} \cdot (\epsilon \vec{\nabla} \phi) = 0$$

Magnétostatique

$$\vec{\nabla} \cdot (\mu \vec{\nabla} \varphi) = 0$$

Sismique (ou élastodynamique)

Mécanique des fluides

$$\vec{\nabla} \cdot (\rho \vec{\nabla} \Phi) = 0$$

Élasticité linéaire

$$\vec{\nabla} \cdot (\vec{C} \vec{\nabla} \vec{u}) = 0$$

Avec ϵ , la permittivité, ϕ , le potentiel électrostatique, μ , la perméabilité, φ , le potentiel magnétostatique, ρ , la densité de masse, Φ , le potentiel de vitesse (pression), \vec{C} , le tenseur d'élasticité de rang 4, et \vec{u} , le vecteur de déplacement.

Pour essayer de faire simple, on a, en rouge, des coefficients de pondération qu'on applique aux champs considérés, en bleu. En observant ces équations, on constate qu'en changeant de type de champ, il « suffit » de changer de type de coefficient de pondération pour retrouver

Morphing appliqué aux simulations numériques dans le cadre de la recherche en sismologie et de la protection des habitats et édifices.

l'équation adaptée au domaine de la physique considéré. Par exemple, si on veut établir une analogie entre un champ électrique et un champ de pression, alors il faut établir l'analogie correspondante entre la permittivité et la densité.

Tout porte donc à croire que le changement d'échelle pour passer de l'optique à la sismique puisse fonctionner.

II.2. État de l'art

Dans le domaine de la protection des habitats et des édifices en sismologie, jusqu'à présent il existe principalement cinq types de solutions. Dans la première catégorie de solutions, l'idée est d'intégrer des amortisseurs dans les fondations des bâtiments ou édifices. Il existe différentes sortes d'amortisseurs, mais, par souci de clarté, je n'entrerai pas dans les détails.

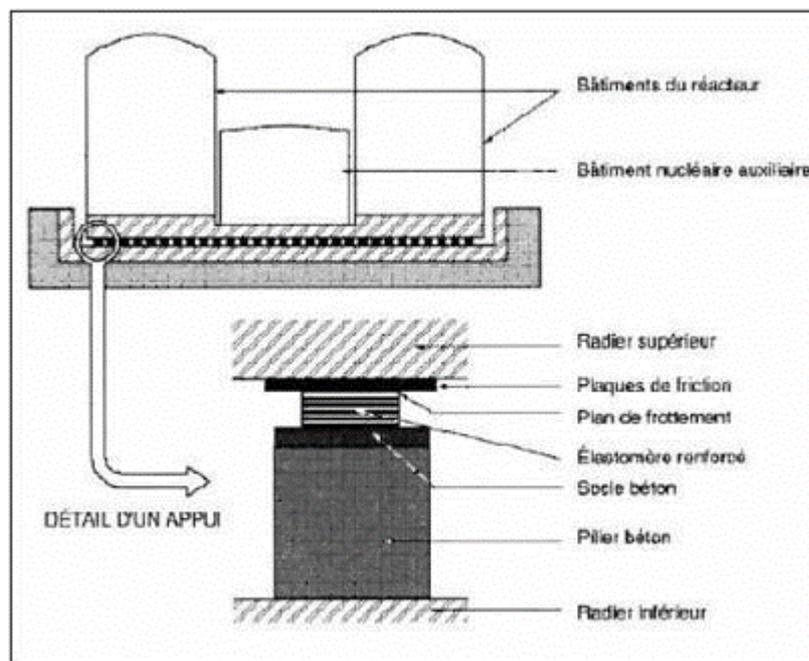


Figure 1 : Exemple d'amortisseurs de type « visqueux »².

Pour ce qui est du deuxième type de solutions, le principe est d'ajouter un contreponds sous forme de pendule au sommet des bâtiments. L'exemple le plus connu est le gratte-ciel « Taipei 101 » à Taïwan qui, muni d'un contreponds de 660 tonnes, a résisté à un séisme de magnitude 6,8 le 31 mars 2002 sans subir le moindre dommage sur sa structure³. Sans trop

Morphing appliqué aux simulations numériques dans le cadre de la recherche en sismologie et de la protection des habitats et édifices.

entrer dans les détails, les oscillations du contrepoids n'étant pas en phase avec celles du bâtiment, les vibrations de ces deux éléments s'atténuent mutuellement.



Figure 2 : Exemple de contrepoids⁴.

Dans la troisième famille de solutions, c'est la structure même des bâtiments et édifices qui atténue les vibrations. Généralement, ce sont des sortes de « croisillons », appelés « contreventements », qui absorbent les oscillations.

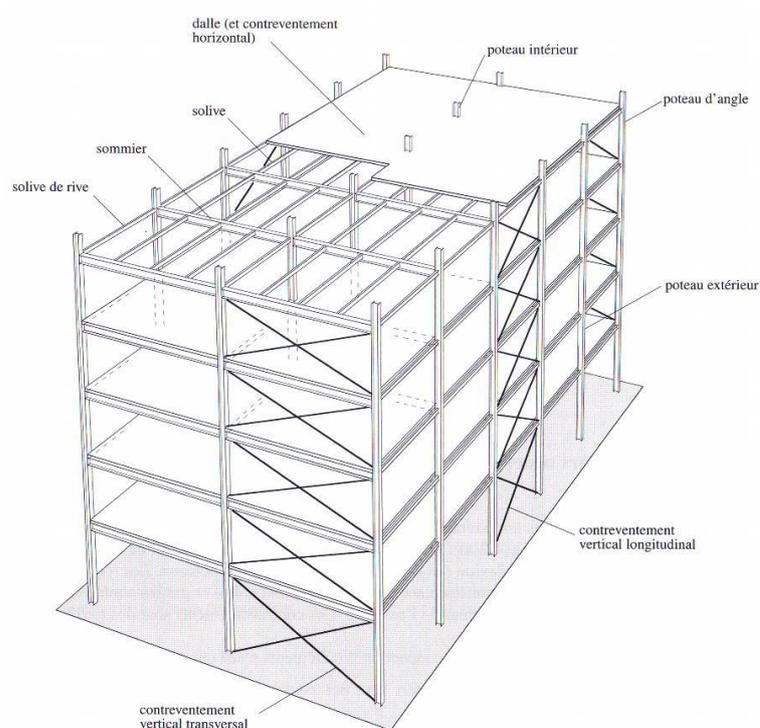


Figure 3 : Exemple de « contreventements »⁵.

En ce qui concerne le quatrième groupe de solutions, ce sont des rails coulissants à différentes orientations qui sont superposés.



Figure 4 : Exemple de rails coulissants⁶.

Enfin, la cinquième et dernière catégorie de solutions réside dans la construction de « tapis de billes » sur lesquels viennent se poser les bâtiments et édifices. Le principe est assez semblable à celui des amortisseurs, la différence étant que les amortisseurs sont ici remplacés par des appuis à roulements.

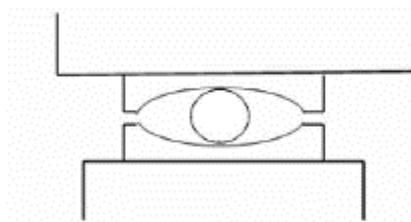


Figure 5 : Exemple d'un appui à roulement⁷.

Toutes ces solutions présentent, malgré tout, l'inconvénient de ne pouvoir s'appliquer qu'aux bâtiments et édifices à construire. Autrement dit, on ne peut pas protéger l'existant avec ces solutions.

Morphing appliqué aux simulations numériques dans le cadre de la recherche en sismologie et de la protection des habitats et édifices.

Il est à noter que lors d'un séisme interviennent quatre types d'ondes : les ondes de compression, les ondes de cisaillement, les ondes de Love et les ondes de Rayleigh. Les deux premières sont dites « ondes de volume » et sont peu destructrices. En revanche, les deux dernières, dites « ondes de surface », bien que plus lentes dans leurs déplacements, sont particulièrement destructrices. Nous nous attachons donc à travailler sur cette catégorie d'ondes.

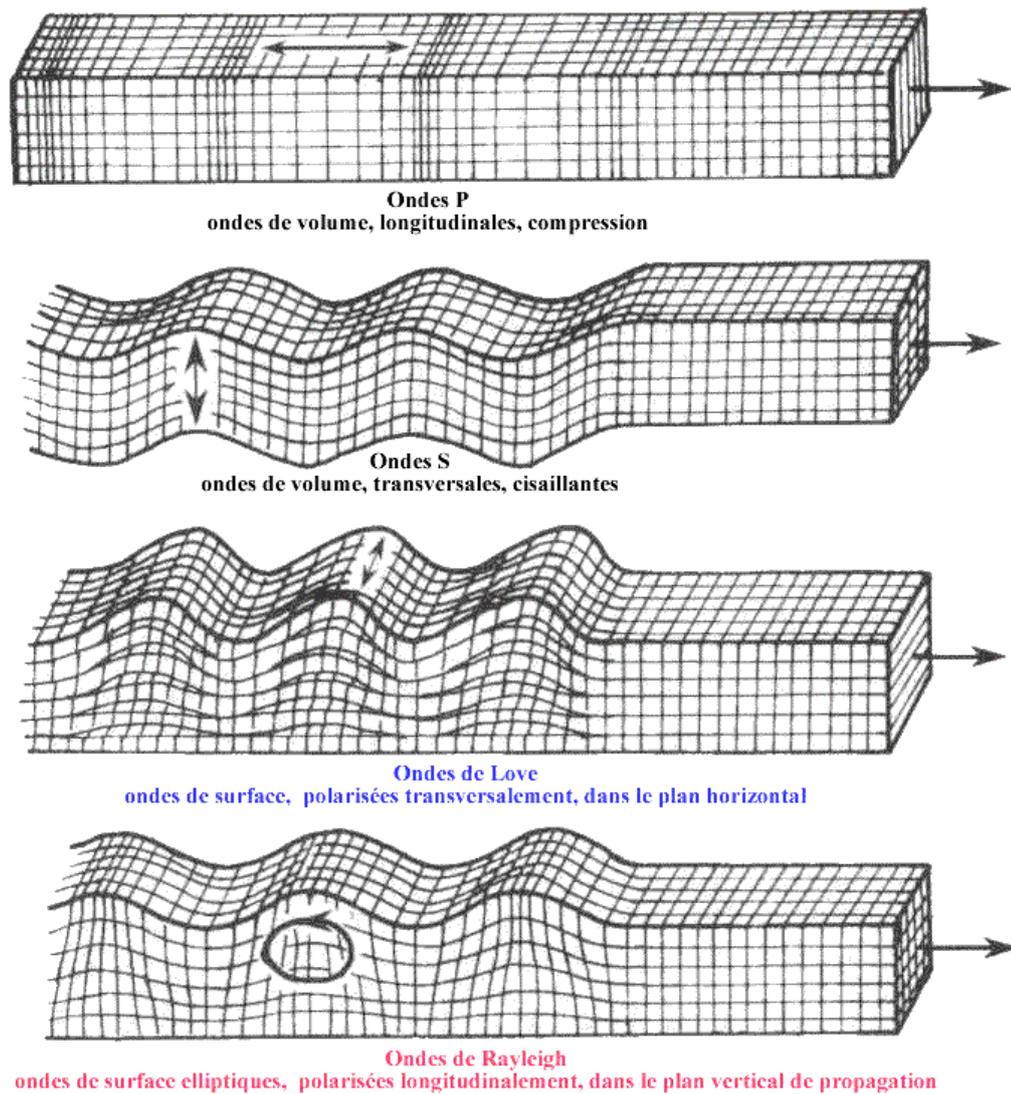


Figure 6 : Illustration des quatre types d'ondes sismiques⁸.

Concernant les simulations numériques, la complexité des ondes à modéliser est telle, que peu d'applications logicielles ont été développées. Nous reviendrons sur ce point dans le paragraphe III.2. Notons également que ces logiciels, déjà fort gourmands tant en ressources processeurs qu'en capacité de mémoire vive, nécessitent d'autant plus de ressources que la

Morphing appliqué aux simulations numériques dans le cadre de la recherche en sismologie et de la protection des habitats et édifices.

précision des calculs demandés est élevée. Par ailleurs, si un seul paramètre doit être modifié, c'est l'ensemble des calculs qui doit être relancé...

Dernier point, pour ce qui est du morphing il existe toute une littérature assez pléthorique lorsqu'il s'agit d'expliquer le fonctionnement du morphing, en revanche, je n'ai rien trouvé sur une application du morphing pour « accélérer » les simulations numériques. Cet état de fait a été confirmé, bien plus tard dans la réalisation de ce projet, par l'étude de brevetabilité, réalisée par une société spécialisée dans ce domaine, et qui a conduit à la même conclusion, ce qui a autorisé le dépôt de brevet, le 6 juin 2015.

A travers mes recherches sur l'état de l'art du morphing, il apparaît qu'il existe une certaine confusion entre « morphing » et « warping ». Ainsi, à chaque fois que j'ai pu trouver un article dont le titre ou le résumé s'approchait de la solution que je propose, il s'est avéré qu'il ne s'agissait pas de « morphing »^{9,10,11,12} au sens dans lequel il est défini dans le paragraphe III.1. Au mieux, il était question de « warping », donc de déformations d'images, au pire, il s'agissait de reconstruction d'image. Le logiciel existant qui peut apparaître comme étant l'outil le plus proche de ce que je propose est « RBF Morph »¹³, mais là encore, en approfondissant le sujet, il s'avère qu'il ne s'agit que de « warping ».

II.3. De l'optique à la sismique : une approche totalement nouvelle

Dans le domaine de l'optique, les métamatériaux présentent un intérêt particulier dans ce qui s'appelle les « capes d'invisibilité », dont l'objectif principal est de masquer la présence d'un obstacle en restituant, en sortie de « cape », la propagation des ondes optiques telle qu'elle aurait été s'il n'y avait pas eu cet obstacle. Le second objectif de ces « capes » est de protéger l'obstacle des ondes optiques, autrement dit, que l'obstacle ne soit pas (ou le moins possible) en contact avec l'onde. Quel que soit l'objectif, le principe reste le même, à savoir, de courber ces ondes optiques de telle sorte qu'elles contournent l'obstacle, à l'image du parcours de l'eau d'une rivière qui contournerait un rocher situé au milieu de cette rivière.

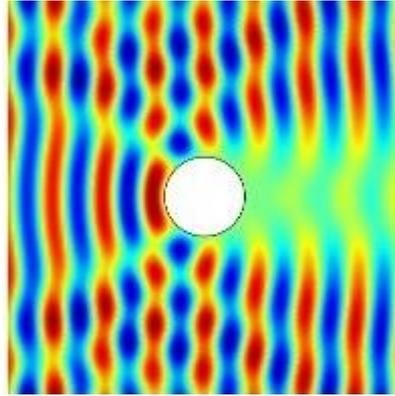


Figure 7 : Une onde plane se propageant du bord gauche vers le bord droit : à la sortie de l'obstacle, l'onde n'est plus plane, donc, par cette déformation, l'obstacle est visible pour un observateur qui se trouverait sur le bord droit. Notons également que cette déformation de l'onde est le résultat de l'interaction de l'obstacle avec cette onde. Il n'y a donc pas de protection de l'obstacle.

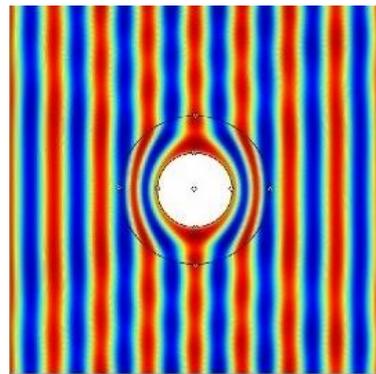


Figure 8 : Même configuration que dans la figure précédente à l'exception de l'obstacle qui, maintenant, est entouré d'une « cape d'invisibilité ». On constate que l'onde ne traverse pas l'obstacle, donc cet obstacle est protégé, et en sortie de cape, l'onde redevient plane. Par conséquent, l'obstacle est invisible pour un observateur qui se trouverait sur le bord droit.

Ce tour de force est réalisable grâce à la variation des indices de réfraction dans la « cape d'invisibilité ». Plus exactement, c'est la géométrie de la structuration de cette « cape », en jouant sur la disposition des différents indices de réfraction des différents matériaux qui la constituent, qui rend possible ce phénomène. Nous sommes donc bien en présence d'un métamatériau.

L'idée, à présent, consiste à imaginer un changement d'échelle par lequel on verrait l'obstacle, typiquement de taille micrométrique en optique, être remplacé par un bâtiment, un

Morphing appliqué aux simulations numériques dans le cadre de la recherche en sismologie et de la protection des habitats et édifices.

édifice, ou un ensemble des deux, et les ondes optiques être remplacées par des ondes sismiques... Autrement dit, en gardant le même principe d'invisibilité mais en l'appliquant à une échelle bien supérieure. Bien entendu, il n'est alors plus question de faire varier les indices de réfraction, lesquels sont totalement inopérants face aux ondes sismiques. En revanche, en étudiant les équations de la mécanique des plaques, on peut penser qu'une variation des densités peut produire sur des ondes sismiques le même effet qu'une variation des indices de réfraction sur des ondes optiques. Voilà en substance l'idée du Dr Sébastien Guenneau.

Outre l'aspect particulièrement novateur d'un tel concept, sa réussite serait révolutionnaire dans le sens où, à la différence de tous les procédés antisismiques qui existent à ce jour, la protection qui peut ainsi être mise en œuvre peut s'appliquer à l'ensemble des bâtiments et édifices déjà existants.

II.4. Du numérique à l'expérimental

Pour ce qui est de l'aspect numérique, il apparaît une grande complexité des équations à résoudre, selon les propriétés physiques des sols, la position des sources d'ondes sismiques, la disposition, la forme, la taille, des variations de densités, la précision souhaitée des calculs, etc...

Pour autant, la mise en œuvre expérimentale est beaucoup plus coûteuse que les simulations numériques. A ce titre, il est donc indispensable d'avoir réalisé toutes les simulations numériques nécessaires et le plus rigoureusement possible avant de procéder à la réalisation expérimentale.

Si pour trouver les solutions numériques il existe des logiciels, pour la mise en œuvre expérimentale, il a fallu trouver un partenaire industriel spécialisé dans le terrassement. C'est donc avec la société Ménard que la transition du numérique vers l'expérimental a été rendue possible.



Figure 9 : Sur la droite, une foreuse simule une onde sismique de 50 Hz, au milieu trois rangées de trous de 30 cm de diamètre, 5 mètres de profondeur, espacés de 1,5 m, et sur la gauche des capteurs (des vélocimètres)¹⁴.

Enfin, pour valider les résultats numériques, il est nécessaire de les confronter à ceux obtenus par les tests expérimentaux. Dans le cas présent, il se trouve qu'il y a une concordance des résultats, ce qui tend à démontrer la validité de la méthode, des calculs, et donc des simulations numériques.

II.5. Contraintes économiques et délais

La grande complexité des équations à résoudre engendre non seulement des temps de calculs démesurés, mais, qui pis est, avec des ressources informatiques importantes, en l'occurrence des centres de calculs.

Si les centres de calculs représentent des investissements dont les coûts sont assez élevés, le C.N.R.S. a toutefois les moyens financiers de réaliser de tels investissements, mais pas pour tous les laboratoires. La conséquence est que ces ressources informatiques doivent être mutualisées pour que tous les laboratoires puissent en bénéficier. En clair, l'organisation de la répartition de la mise à disposition de ces moyens entre les différents laboratoires est si complexe qu'elle en est dissuasive. Dans les faits, il est des formulaires de demande à remplir

Morphing appliqué aux simulations numériques dans le cadre de la recherche en sismologie et de la protection des habitats et édifices.

et à envoyer avant d'attendre la réponse sur la possibilité, ou non, de disposer, sur une période bien limitée, de ces moyens...

La solution adoptée pour ce projet a donc été d'investir trente mille euros dans un petit centre de calcul local, composé de soixante-quatre cœurs à deux GHz et d'un To de mémoire vive, dont nous sommes les seuls utilisateurs. Malgré tout, les temps de calculs se comptent en jours pour chaque simulation. En ce qui me concerne, les simulations numériques les plus imposantes que j'ai eu à exécuter ont nécessité quatre jours sur ce petit centre de calculs.

III. Solutions proposées

III.1. Le morphing, son fonctionnement et sa pertinence dans le contexte défini

Historiquement, dans le monde artistique, qu'il soit littéraire avec les contes (de l'enchanteur Merlin, jusqu'à Pinocchio, en passant par le roi grenouille), ou cinématographique avec les premiers effets spéciaux (« Dracula » en 1931, « Le Loup-garou » en 1941, ou encore « La Mouche noire » en 1958), il y a toujours eu cette idée consistant à vouloir transformer une personne en une autre, ou en autre chose. Pour y parvenir, la première technique cinématographique fut ce qu'on appelle un « fondu », c'est-à-dire une superposition progressive d'une seconde image sur la première, et dans le même temps, la première image qui s'estompe tout aussi progressivement.

C'est à partir de ce principe que la société « Industrial Light and Magic » a développé un premier logiciel de morphing dans le but de réaliser les effets spéciaux du film « Willow » produit et coécrit par Georges Lucas et réalisé par Ron Howard en 1988.

Si ce logiciel s'inscrit dans la première génération de logiciels de morphing, c'est-à-dire au moyen rudimentaire d'une simple interpolation linéaire sur les couleurs des pixels, en revanche, la seconde génération de logiciels de morphing est, quant à elle, bien plus élaborée.

En effet, pour définir cette seconde génération de logiciels de morphing, on peut dire qu'il s'agit d'une transformation de plan entre deux images, avec une double interpolation linéaire,

Morphing appliqué aux simulations numériques dans le cadre de la recherche en sismologie et de la protection des habitats et édifices.

basée à la fois sur les formes et les couleurs, et dont l'objectif est de transformer la première image jusqu'à ce qu'elle soit identique à la seconde. Il apparaît alors qu'il faille indispensablement deux images, l'une étant appelée la « source », et l'autre la « destination ». De plus, ces deux images doivent avoir les mêmes dimensions, et certains logiciels de morphing proposent même une fonction pour égaliser les dimensions d'une image en les faisant correspondre à celles de l'autre image. En rentrant plus dans les détails, il s'avère qu'il existe plusieurs méthodes pour procéder à la transformation de plan, mais que quelle que soit la méthode utilisée, la méthode considérée repose rigoureusement sur des fondements mathématiques bien établis. De même, l'utilisation de repères, appelés « points de contrôle », est commune à toutes ces méthodes. Il appartient à l'utilisateur de placer soigneusement ces « points de contrôle », sachant qu'à un « point de contrôle » dans l'image source correspond un et un seul « point de contrôle » dans l'image destination. Dans les faits, le logiciel de morphing doit établir la correspondance des coordonnées entre l'image source et l'image destination pour chacun des « points de contrôle ».

Voici donc, maintenant, le détail de ce que je considère être les trois principales méthodes utilisées dans les logiciels de morphing de deuxième génération :

La première méthode consiste à appliquer une triangulation de Delaunay. L'utilisateur du logiciel place ses « points de contrôle », et l'application considère ces « points de contrôle » comme des nœuds d'un maillage en forme de triangles. Si l'utilisateur ne place aucun point de contrôle, ou s'il y a des zones de l'image dépourvues de nœud, l'application prendra en compte les coordonnées des pixels de l'image comme références. En clair, un pixel de coordonnées (x,y) dans l'image source, aura exactement les mêmes coordonnées dans l'image destination.

La particularité de la triangulation de Delaunay réside dans le choix des nœuds qui constitueront des mailles en forme de triangle. En effet, la règle principale (de cette triangulation) indique qu'un nœud ne doit être relié qu'avec les deux nœuds les plus proches. Il ne peut pas y avoir de croisement ou de chevauchement des liens entre les nœuds, et si le troisième nœud est aligné avec les deux premiers (cas du triangle plat), alors on remplace ce troisième nœud par le nœud le plus proche qui ne soit pas aligné avec les deux premiers. A terme, l'objectif est que chaque pixel de l'image soit dans un triangle.

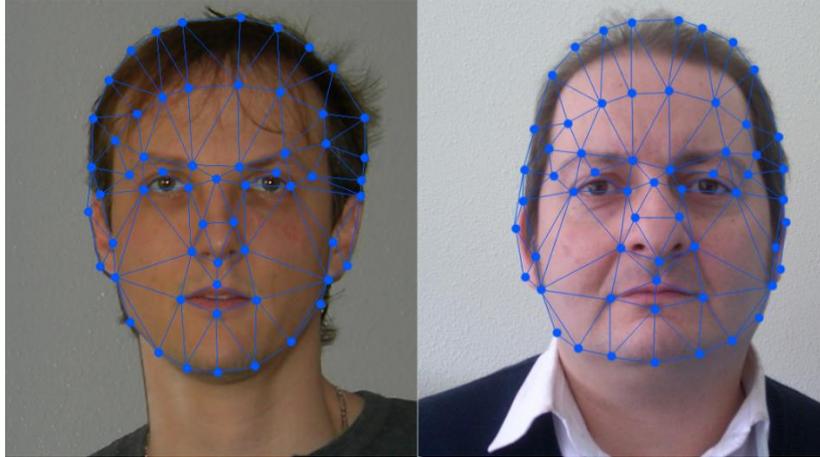


Figure 10 : Exemple de maillage selon la triangulation de Delaunay.

L'étape suivante consiste à trouver les coordonnées relatives de chaque pixel par rapport, à la fois, au sommet le plus proche et au point de gravité du triangle dans lequel se trouve ce pixel.

Enfin, en connaissant les coordonnées de chacun des sommets (ceux-ci étant des « points de contrôle »), et en appliquant une simple règle de trois sur les distances selon les proportions des triangles, on trouve les coordonnées dans l'image de destination du pixel de l'image source.

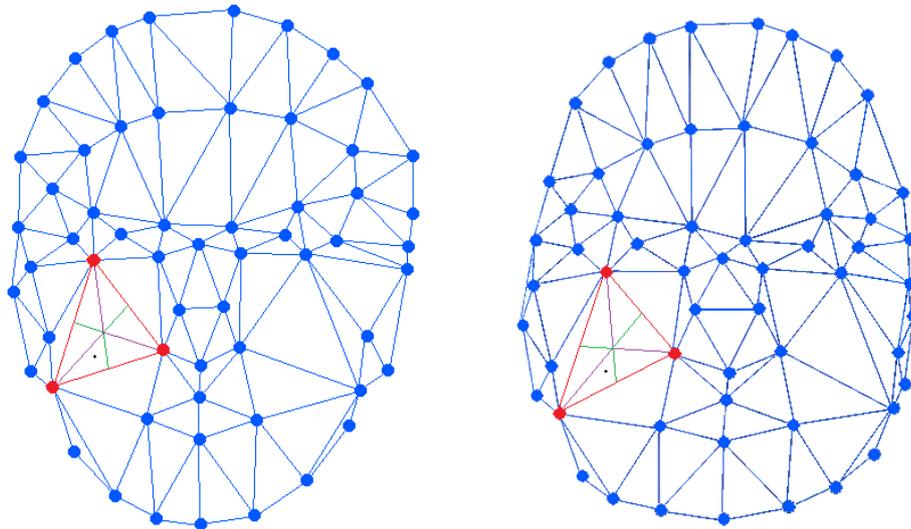


Figure 11 : La maille triangulaire représentée en rouge dans le maillage de gauche (image source) se transforme en une maille triangulaire représentée en rouge dans le maillage de droite (image de destination). Dans le triangle rouge de gauche il y a un pixel représenté en noir dont il faut déterminer les nouvelles coordonnées dans le triangle rouge de droite.

En effet, tel que le montre la figure 11, pour tout pixel à l'intérieur d'une maille triangulaire dans l'image source, on calcule la distance entre ce pixel et le segment de droite qui va du sommet (ou du nœud) le plus proche de ce pixel jusqu'au point de gravité du triangle représentant la maille considérée. Une fois cette distance calculée, on la pondère par un coefficient d'échelle (le rapport entre, la longueur de la médiane sur l'image de destination, passant par le sommet, correspondant au sommet le plus proche du pixel considéré dans l'image source, et la longueur de la médiane sur l'image source passant par le sommet le plus proche du pixel considéré). On obtient ainsi la distance entre le transformé de ce pixel dans l'image de destination et le segment de droite allant du nœud, dans l'image de destination, correspondant au nœud considéré dans l'image source, jusqu'au point de gravité du triangle constituant la maille correspondante à la maille considérée dans l'image source...

Pour essayer de simplifier, nommons ABC le triangle dans l'image source, G son point de gravité, et P le pixel de l'image source dont il faut trouver les coordonnées dans l'image destination, en considérant que le point A soit le sommet le plus proche de P. Sachant également que les points A, B, et C sont en réalité des nœuds dans l'image source dont on connaît non seulement les coordonnées mais également les nouvelles coordonnées dans l'image de destination, selon le principe des « points de contrôle » défini précédemment. Ainsi, on sait que le triangle ABC deviendra le triangle A'B'C' dans l'image de destination, et on connaît les coordonnées des points A', B', et C'. On peut donc calculer les coordonnées de G', le point de gravité du triangle A'B'C', et il ne reste plus qu'à déterminer les coordonnées du point P', le transformé de P dans l'image de destination.

Pour y parvenir, on définit d'abord le coefficient d'échelle E qui est égal à la longueur du segment [A'G'] divisé par la longueur du segment [AG]. On pose D, la distance entre le point A et le point de projection orthogonale de P sur le segment [AG]. On pose également L, la longueur entre le point P et le point de projection orthogonale de P sur le segment [AG]. Sur l'image de destination on aura donc D', la distance entre le point A' et le point de projection orthogonale de P' sur le segment [A'G'], qui sera égale à D multiplié par E, et L', la longueur entre le point P' et le point de projection orthogonale de P' sur le segment [A'G'], qui sera égale à L multiplié par E, en appliquant le théorème de Thalès. Ensuite, à partir des coordonnées des points A' et G' on peut déduire l'équation de la droite (A'G') ainsi que l'équation de toute droite perpendiculaire à (A'G'). En connaissant l'équation de la droite

Morphing appliqué aux simulations numériques dans le cadre de la recherche en sismologie et de la protection des habitats et édifices.

($A'G'$) ainsi que la distance D' , on peut déterminer les coordonnées du point de projection orthogonale de P' sur le segment $[A'G']$, et en connaissant l'équation de toute droite perpendiculaire à la droite ($A'G'$), on peut déduire l'équation de la droite perpendiculaire à la droite ($A'G'$) qui passe par le point P' . Enfin, à partir de cette dernière équation de droite, des coordonnées du point de projection orthogonale de P' sur le segment $[A'G']$, et de la longueur L' , on peut connaître les coordonnées du point P' .

En procédant ainsi pour chaque pixel de l'image source, on procède à la transformation de plan qui transforme l'image source en l'image de destination, et on peut donc aisément réaliser l'interpolation linéaire sur les formes. Pour être précis, en connaissant les coordonnées des points P et P' , on peut déduire l'équation de la droite passant par ces deux points. En considérant que cette équation de droite est la fonction qui détermine les coordonnées de l'ensemble des points intermédiaires entre P et P' , je considère donc cette équation de droite comme étant la fonction d'interpolation linéaire entre P et P' . Pour ce qui est des couleurs, le problème est bien plus simple, d'autant plus qu'à présent on connaît la correspondance des coordonnées entre l'image source et l'image destination. Autrement dit, pour chaque pixel de l'image source on connaît désormais non seulement la couleur de ce pixel, mais également, la couleur que devra avoir ce pixel dans l'image destination. Les couleurs étant purement des valeurs numériques, même si elles sont réparties sur les trois composantes : rouge, vert, et bleu, l'interpolation linéaire sur les couleurs est, de fait, particulièrement simple à réaliser.

Pour en finir avec la triangulation de Delaunay, il est à noter que cette triangulation est souvent associée au diagramme de Voronoï : un découpage du plan en « zones d'influence ». L'unité considérée n'est plus la maille triangulaire, mais le nœud. Notons qu'en travaillant sur les mailles triangulaires, les « zones d'influence » des nœuds, au sein de la maille, sont déterminées par les segments de médianes qui vont des côtés opposés aux sommets (aux nœuds) jusqu'au point de gravité. Ces segments sont représentés en couleur verte dans la figure 11. Pour ce qui est du diagramme de Voronoï, avec un tel découpage, on ne travaille plus sur les médianes mais sur les médiatrices, et, plus exactement, sur les orthocentres des triangles. En fait, on ne trace une arête qu'entre deux orthocentres adjacents. On obtient alors un polygone (une « cellule ») autour de chaque nœud, et on considère que tous les pixels situés à l'intérieur de ce polygone doivent prendre le nœud à l'intérieur de ce polygone comme référence pour procéder à leurs changements de coordonnées. On comprend

Morphing appliqué aux simulations numériques dans le cadre de la recherche en sismologie et de la protection des habitats et édifices.

rapidement qu'une telle méthode est beaucoup plus compliquée et que l'algorithme qui en découle est nécessairement plus « lourd », ne serait-ce que dans la mesure où il y a nécessairement plus de nœuds que de mailles triangulaires à prendre en compte. C'est donc par choix que je n'ai pas développé la méthode du diagramme de Voronoï pour la triangulation de Delaunay.

La deuxième méthode repose sur des distorsions basées sur les caractéristiques de l'image. Les « points de contrôle » sont pris en compte par paires, et les repères, contrairement à la triangulation de Delaunay, ne sont plus ces « points de contrôle » considérés de manière individuelle, mais des segments de droites délimités par des paires de « points de contrôle ». Plus exactement, les zones particulières sont caractérisées par des segments de droites, chacun de ces segments de droites est défini par deux « points de contrôle », et il n'y a aucun lien entre les segments de droites, il n'y a pas de maillage : un « point de contrôle » est relié à un unique « point de contrôle ». Ceci étant, rien n'interdit de superposer deux « points de contrôle », tel qu'on peut le voir sur la figure 12, sur la partie du nez située entre les deux yeux. Bien entendu, comme dans la méthode précédente, il existe encore une correspondance entre l'image source et l'image destination. En effet, à un segment de droite dans l'image source correspond un et un seul segment de droite dans l'image destination.



Figure 12 : Exemple de distorsions basées sur les caractéristiques des images.

Morphing appliqué aux simulations numériques dans le cadre de la recherche en sismologie et de la protection des habitats et édifices.

Pour déterminer les nouvelles coordonnées (dans l'image destination) d'un pixel de l'image source, on procède, dans un premier temps, à la recherche du segment de droite le plus proche de ce pixel. Ensuite, en considérant que nous connaissons aussi bien les coordonnées des deux « points de contrôle » qui constituent le segment de droite dans l'image source, que les coordonnées des deux « points de contrôle » qui constituent le segment de droite dans l'image destination, de même que les coordonnées du pixel à traiter dans l'image source, en procédant exactement de la même manière que dans la méthode précédente, on peut déterminer les nouvelles coordonnées de ce pixel dans l'image de destination.

Enfin, en connaissant les nouvelles coordonnées dans l'image destination de chaque pixel de l'image source, on peut aisément réaliser les interpolations linéaires sur les formes et les couleurs, exactement de la même manière que dans la méthode précédente.

La troisième méthode ressemble un peu à la première, notamment dans le découpage des images en différentes zones, à ceci près que les mailles ne sont plus, maintenant, des triangles, mais des quadrilatères. Grossièrement, on peut considérer qu'il y a deux partages des images : le premier, par une succession de lignes sensiblement horizontales, et le second, par une succession de lignes plus ou moins verticales. En réalité, chaque nœud doit se trouver à l'intersection d'une ligne pratiquement horizontale et d'une ligne presque verticale. Dans cette méthode également, il y a une relation bijective entre les nœuds de l'image source et ceux de l'image destination, à savoir, qu'à un nœud de l'image source correspond un et un seul nœud de l'image destination. De même, les coordonnées de chacun des nœuds sont connues, que ce soit dans l'image source ou dans l'image destination.

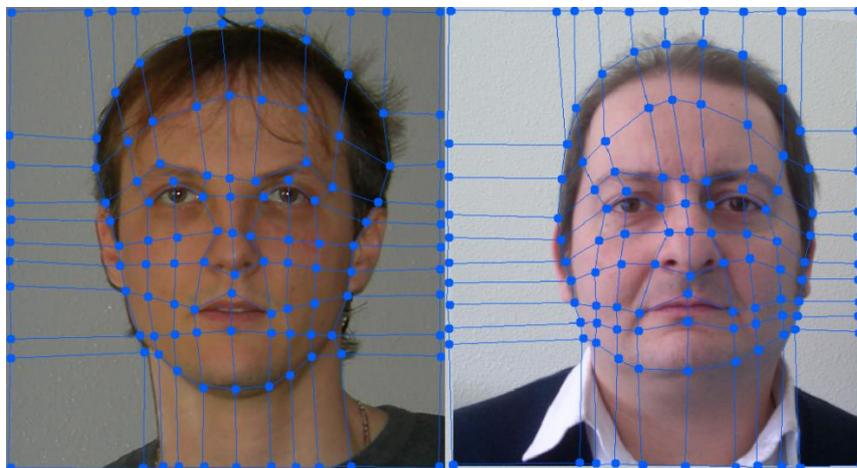


Figure 13 : Exemple de maillage « carré », formé par des quadrilatères.

Le principe de cette méthode consiste à trouver une fonction capable de déterminer, pour chaque nœud de coordonnées (x,y) dans l'image source, les coordonnées (x',y') du nœud de l'image de destination qui correspond au nœud de coordonnées (x,y) dans l'image source... Trouver une telle fonction reste néanmoins un défi. Nul doute que nos collègues mathématiciens se plairaient à relever un tel défi, toutefois, la communauté des informaticiens ayant le bon goût du pragmatisme, elle a choisi de décomposer ce problème en deux processus bien plus simples à résoudre. En effet, en ne s'attachant qu'à transformer les abscisses dans un premier temps, puis seulement les ordonnées dans un second temps, il apparaît clairement qu'une simple fonction d'interpolation suffit à régler notre problème.

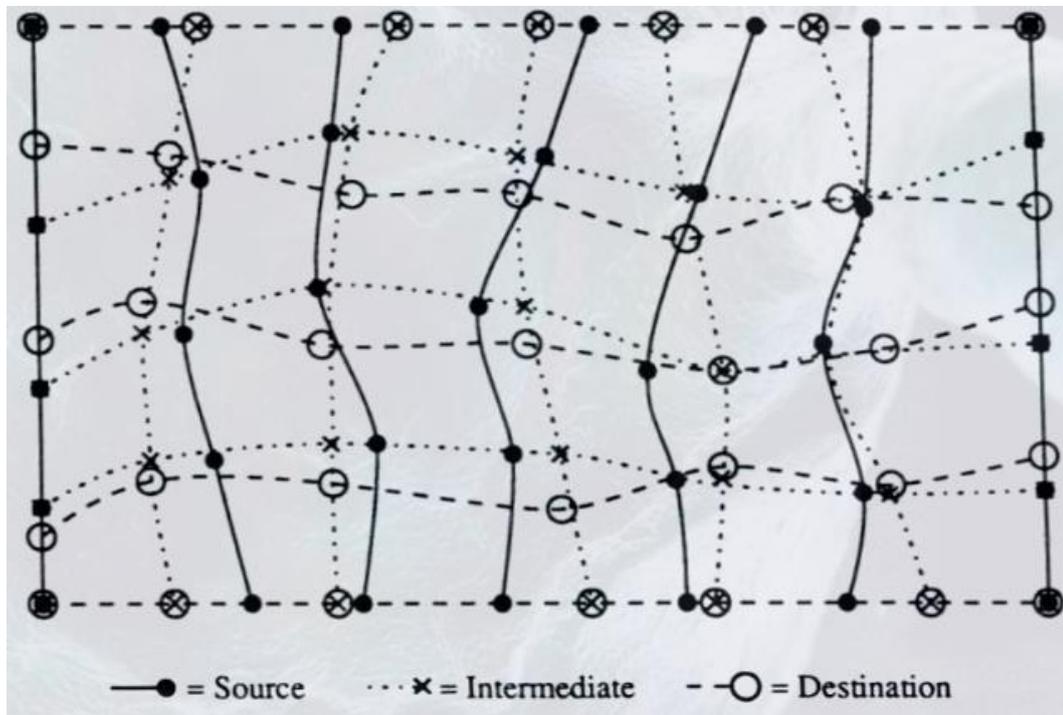


Figure 14 : Illustration des changements de coordonnées par abscisses puis par ordonnées¹⁵.

Pour mettre en œuvre cette solution, on crée un maillage intermédiaire virtuel dans lequel chaque nœud intermédiaire a l'abscisse du nœud correspondant dans l'image destination, tout en conservant l'ordonnée du nœud correspondant dans l'image source.

La première étape consiste alors à déterminer une fonction pour chaque ligne horizontale du maillage, de telle sorte que, quel que soit le nœud considéré sur la ligne horizontale considérée, la fonction de cette ligne horizontale indique pour l'abscisse de ce nœud,

Morphing appliqué aux simulations numériques dans le cadre de la recherche en sismologie et de la protection des habitats et édifices.

l'abscisse du nœud correspondant dans l'image destination. En clair, admettons que nous ayons « n » nœuds par ligne horizontale, et que nous traitons la ligne horizontale numéro « h », alors, pour tout « i » allant de 1 à n, on a la relation suivante : $x'_i = f_h(x_i)$, avec x_i , l'abscisse du nœud numéro « i » dans l'image source, x'_i , l'abscisse du nœud numéro « i » correspondant dans l'image destination, et f_h , la fonction d'interpolation de la ligne horizontale numéro « h » qui fait correspondre, à chaque abscisse d'un nœud de cette ligne horizontale, l'abscisse du nœud correspondant dans la ligne horizontale correspondante dans l'autre image.

La seconde étape est relativement similaire à la première, à la différence près que ce ne sont plus les lignes horizontales, mais les lignes verticales, du maillage, qui sont considérées. Ainsi, pour chaque ligne verticale du maillage on détermine une fonction qui calcule, à chaque nœud de cette ligne verticale, pour l'ordonnée du nœud dans l'image source, l'ordonnée du nœud correspondant dans l'image destination. En clair, pour un nombre « n » de nœuds par ligne verticale, avec « i » allant de 1 à n, et pour la ligne verticale numéro « v », on a la relation suivante : $y'_i = g_v(y_i)$, avec y_i , l'ordonnée du nœud numéro « i » dans l'image source, y'_i , l'ordonnée du nœud numéro « i » correspondant dans l'image destination, et g_v , la fonction d'interpolation de la ligne verticale numéro « v » qui fait correspondre, à chaque ordonnée d'un nœud de cette ligne verticale, l'ordonnée du nœud correspondant dans la ligne verticale correspondante dans l'autre image.

En procédant ainsi, on connaît, pour chaque nœud du maillage, c'est-à-dire, pour chaque intersection d'une ligne horizontale et d'une ligne verticale, la fonction de transformation pour les abscisses, de même que la fonction de transformation pour les ordonnées. En conséquence, pour chaque pixel de coordonnées (x,y) dans l'image source, il suffit de trouver le nœud le plus proche de ce pixel, puis d'appliquer les fonctions de transformations (propres à ce nœud) en abscisse et en ordonnée aux coordonnées (x,y) pour déterminer les coordonnées (x',y') du pixel dans l'image destination correspondant au pixel considéré dans l'image source.

Encore une fois, en connaissant les nouvelles coordonnées dans l'image destination de chaque pixel de l'image source, on peut aisément réaliser les interpolations linéaires sur les formes et les couleurs, exactement de la même manière que dans les deux méthodes précédentes.

Morphing appliqué aux simulations numériques dans le cadre de la recherche en sismologie et de la protection des habitats et édifices.

Pour en terminer avec le fonctionnement du morphing, je précise que lorsque j'évoque ce mot dans ce mémoire, je ne considère que cette deuxième génération de logiciels.

La question qui se pose à présent, est celle de la pertinence du morphing quand on l'applique à des simulations numériques. A première vue, on peut penser que trois hypothèses s'offrent à nous : soit les résultats numériques et les résultats obtenus par le morphing sont parfaitement identiques, soit ils sont proches, soit ils sont totalement différents.

Si le paragraphe suivant détaille le fonctionnement des simulations numériques, pour l'instant, il faut juste considérer que ces simulations numériques ne sont que la représentation graphique, géométrique, résultant des équations de la physique, mises en œuvre dans un contexte bien défini par l'utilisateur, à travers des paramètres choisis. Ces équations de la physique reposent sur des fondements mathématiques, au même titre que les transformations de plans réalisées par le morphing. Pour autant, ces équations ne sont pas du premier degré, donc la progression entre deux résultats numériques ne peut pas être « linéaire » (au sens de « rectiligne »), contrairement à la progression des résultats intermédiaires entre les deux « images » par le morphing, tel que le démontre le fonctionnement même du morphing.

Par conséquent, on est en droit de penser que, sur les trois hypothèses émises quant à la pertinence du morphing, la plus probable serait la deuxième hypothèse, à savoir celle selon laquelle le morphing nous donnerait un résultat proche du résultat numérique.

III.2. Les éléments finis et les différences finies en domaine temporel

Pour réaliser une simulation numérique, le principe consiste à dessiner la structure à analyser, la placer dans un champ, puis procéder aux calculs des déplacements des éléments selon certains paramètres définis comme la fréquence, l'amplitude, et le type du signal source (planaire ou concentrique), tout comme le nombre et la (ou les) position(s) du (ou des) signal (signaux) source(s).

Pour y parvenir, il existe deux principales méthodes de calculs : les éléments finis et les différences finies en domaine temporel (ou « Finite Difference Time Domain »). Quelle que

Morphing appliqué aux simulations numériques dans le cadre de la recherche en sismologie et de la protection des habitats et édifices.

soit la méthode utilisée, le champ et la structure à analyser sont décomposés selon un maillage, et l'ensemble des calculs s'appliquera aux nœuds de ce maillage.

La méthode des éléments finis consiste à définir une fonction de calcul des déplacements puis d'appliquer cette fonction à chacun des nœuds du maillage. Les logiciels qui utilisent cette méthode sont : Comsol, Ansys, C.S.T., Abacus, ...

La méthode des différences finies en domaine temporel (ou F.D.T.D.) consiste à calculer le déplacement d'un nœud à un instant t par rapport aux déplacements des nœuds adjacents à l'instant $t-1$. Les logiciels qui utilisent cette méthode sont : SimSonic, VSim7, ...

En ce qui me concerne, j'ai appris à utiliser le logiciel SimSonic et ma principale difficulté a été de comprendre les phénomènes physiques de sorte à obtenir des résultats exploitables. En l'espèce, si le maillage n'est pas assez fin par rapport à la longueur d'onde du signal considéré, aucun résultat exploitable ne pourra être obtenu.

III.3. Les trois types d'application du morphing aux simulations numériques

Le premier type d'application du morphing, que nous appellerons méthode « spatiale », consiste à récupérer les résultats de deux simulations numériques ayant pour principale différence la forme de l'obstacle utilisée dans chacune de ces simulations. À partir de ces deux résultats, à l'aide d'un logiciel de morphing, on produit un « résultat » intermédiaire. Ce dernier doit être comparé au résultat de la simulation numérique relatif à la forme d'obstacle intermédiaire entre les deux formes d'obstacles pour lesquels on a préalablement réalisé les simulations. Cette comparaison détermine l'efficacité (ou le manque d'efficacité) du morphing pour ce type d'application.

Il est également intéressant de confronter le morphing à différents types de physiques, et de le tester aussi bien à travers la méthode des éléments finis que par la F.D.T.D. C'est donc en utilisant la méthode « spatiale » que je procéderai à ces tests.

Morphing appliqué aux simulations numériques dans le cadre de la recherche en sismologie et de la protection des habitats et édifices.

Le deuxième type d'application du morphing, que nous appellerons méthode « temporelle », consiste à récupérer les résultats d'une seule simulation numérique, pour une seule forme d'obstacle, mais à des instants différents. Ainsi nous prendrons en compte un résultat à l'instant t et un autre résultat (de la même simulation) à un instant $t + n$. L'idée est de comparer le résultat intermédiaire produit par le morphing entre ces deux résultats avec le résultat obtenu par la simulation numérique à l'instant $t + \frac{1}{2} n$.

A première vue, on serait tenté de penser que si on a obtenu tous les résultats de notre simulation numérique jusqu'à l'instant $t + n$, alors on a déjà obtenu le résultat à l'instant $t + \frac{1}{2} n$, autrement dit, qu'il est inutile d'utiliser le morphing pour obtenir un résultat que nous connaissons déjà. En réalité, l'objectif est différent : en partant du principe qu'on ne détermine qu'au départ la taille de l'intervalle de temps entre deux résultats, et que si cet intervalle de temps est trop grand, alors on doit recommencer toute la simulation numérique si on souhaite des résultats plus précis, avec un intervalle de temps plus petit. On peut donc imaginer qu'avec le morphing, par sa méthode « temporelle », on pourrait retrouver tous les résultats intermédiaires entre le résultat à l'instant t et le résultat à l'instant $t + 1$, ce qui nous dispenserait de devoir tout recommencer.

Enfin, le troisième type d'application du morphing, que nous appellerons méthode « fréquentielle », consiste à récupérer les résultats de deux simulations numériques ayant pour principale différence la fréquence de l'onde émise dans chacune de ces simulations. À partir de ces deux résultats, à l'aide du logiciel de morphing, on produit un « résultat » intermédiaire. Ce dernier doit être comparé au résultat de la simulation numérique relatif à la fréquence d'onde intermédiaire entre les deux fréquences d'onde pour lesquelles on a préalablement réalisé les simulations. Cette comparaison détermine l'efficacité (ou le manque d'efficacité) du morphing pour ce type d'application.

III.4. Réalisation

Pour ce qui est de la réalisation, les premiers tests d'application du morphing ont été mis en œuvre selon la méthode « spatiale ». C'est avec les équations de l'électromagnétisme, en utilisant la méthode des éléments finis, et sur des capes d'invisibilité de formes différentes que j'ai débuté les tests sur l'application du morphing. En effet, en ayant les résultats pour une

Morphing appliqué aux simulations numériques dans le cadre de la recherche en sismologie et de la protection des habitats et édifices.

cape d'invisibilité de forme circulaire, une autre de forme elliptique et une dernière de forme elliptique intermédiaire (avec une excentricité intermédiaire entre l'excentricité de la cape d'invisibilité en forme d'ellipse et celle de forme circulaire), j'ai appliqué le morphing entre les deux premières et j'ai obtenu un résultat assez proche du résultat intermédiaire obtenu par le calcul.

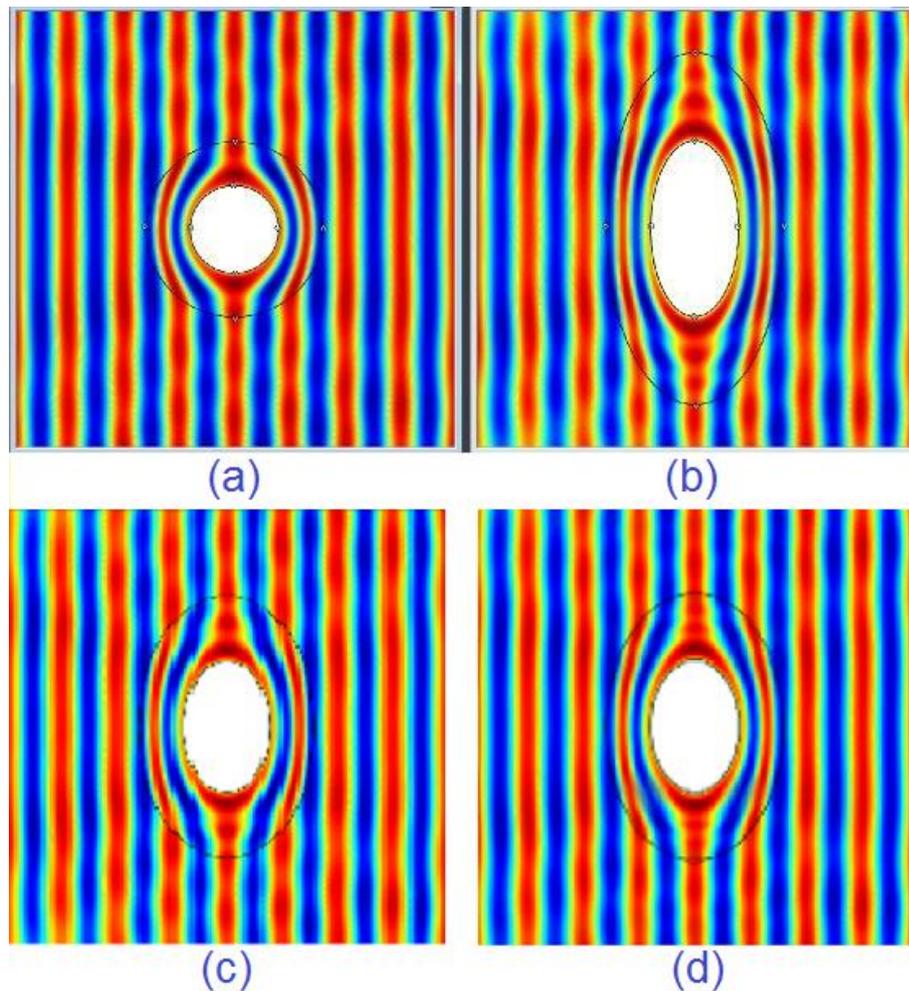


Figure 15 : Propagation d'une onde électromagnétique plane, de gauche à droite, incidente sur une cape d'invisibilité de forme circulaire en (a), de forme elliptique en (b), et d'une forme elliptique en (c) avec une excentricité intermédiaire entre celle du cercle en (a) et celle de l'ellipse en (b). Enfin, en (d) on a le résultat produit par le morphing entre (a) et (b). Ce résultat s'avère proche de celui obtenu en (c).

Ces premiers résultats relativement concluants avec l'ensemble des données numériques, ont, pour pouvoir reproduire ces simulations, fait l'objet d'une publication dans une revue scientifique.

Ensuite, en changeant de type de physique, c'est-à-dire en travaillant avec les équations de l'élastodynamique (utilisées pour la sismique), en utilisant la méthode F.D.T.D., et en restant sur l'application du morphing selon la méthode « spatiale », j'ai réalisé deux types de simulations numériques : dans un contexte usuel, dans un contexte extrême. Le contexte extrême démontre les limites de l'utilisation du morphing et est détaillé dans le paragraphe IV.3. En ce qui concerne le contexte usuel, nécessaire à démontrer l'efficacité du morphing appliqué aux simulations numériques, j'ai réalisé trois simulations numériques en F.D.T.D. à l'aide du logiciel « SimSonic », pour trois lentilles d'épaisseurs différentes.

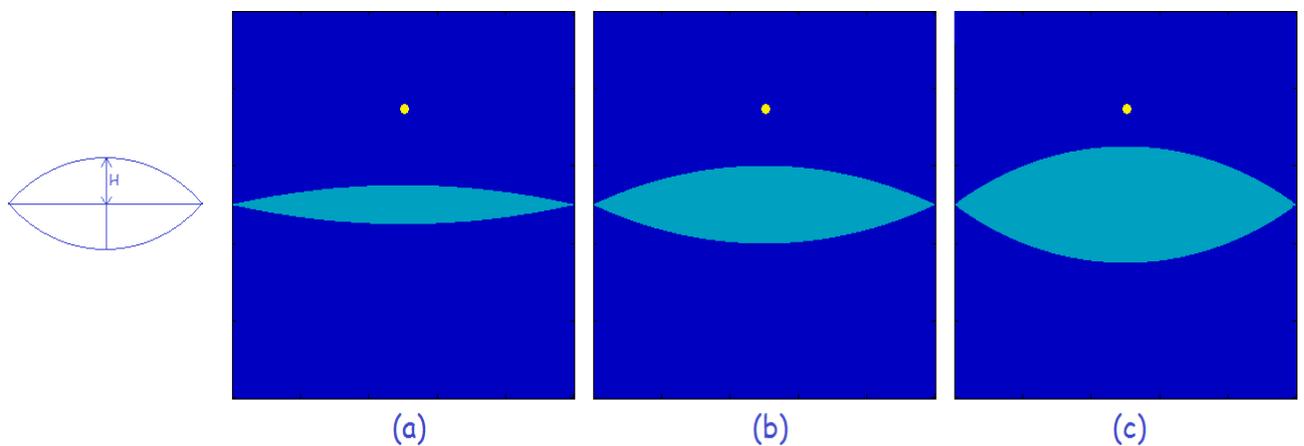


Figure 16 : Illustration des différentes épaisseurs de lentille avec $H = 2,5$ cm en (a), $H = 5$ cm en (b), et $H = 7,5$ cm en (c).

L'idée est d'appliquer le morphing entre le résultat numérique pour la lentille la moins épaisse et celui relatif à la lentille la plus épaisse, puis de comparer le résultat obtenu par le morphing avec le résultat obtenu par les calculs pour la lentille d'épaisseur intermédiaire.

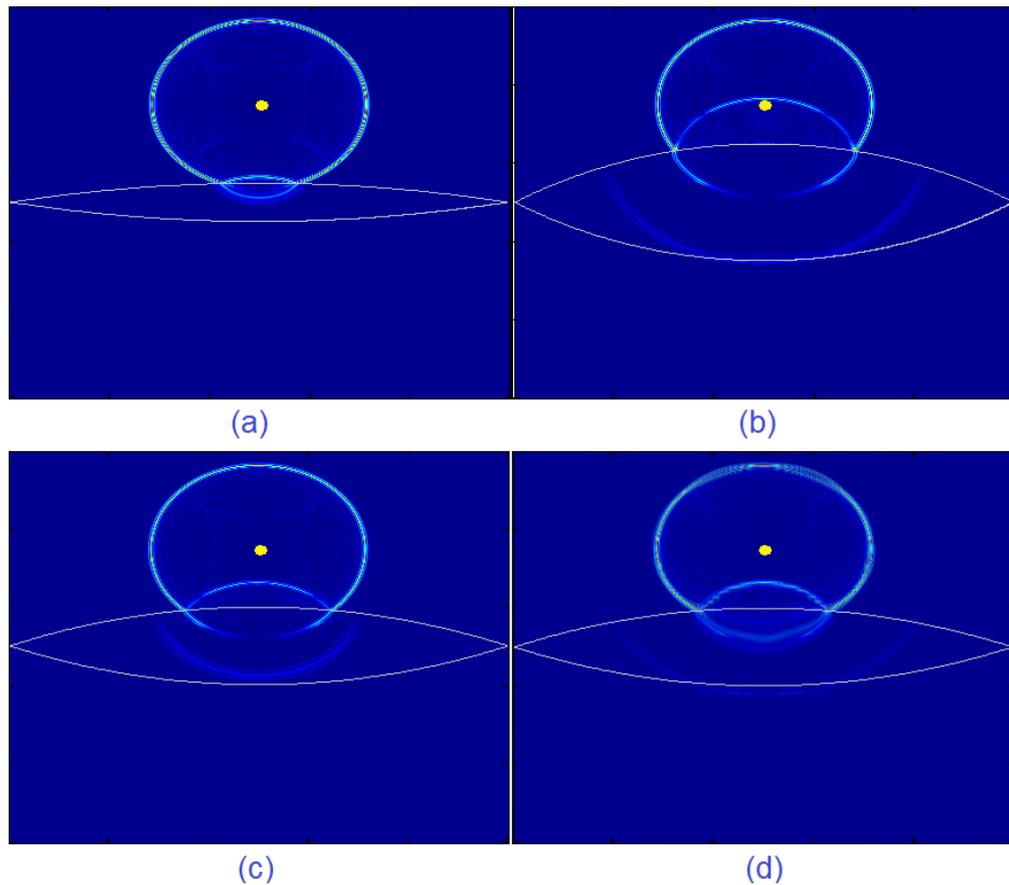


Figure 17 : Lentille d'épaisseur $H = 2,5$ cm en (a), $H = 7,5$ cm en (b), $H = 5$ cm en (c) et (d). Tous les résultats ont été relevés à $t = 140 \mu\text{s}$. Il est à noter que ces résultats sont calculés sauf en (d) qui est le résultat du morphing entre (a) et (b). Il semblerait que les résultats (c) et (d) soient assez proches.

Ces seconds résultats, également relativement concluants quant à l'efficacité du morphing, démontrent qu'en changeant de type de physique, en l'occurrence, en passant de l'électromagnétisme à l'élastodynamique, autrement dit, en utilisant différents types d'équations, l'efficacité du morphing est préservée.

Morphing appliqué aux simulations numériques dans le cadre de la recherche en sismologie et de la protection des habitats et édifices.

L'étape suivante a consisté à tester le second type d'application du morphing, à savoir, la méthode « temporelle ». Pour ce test, j'ai réalisé trois simulations numériques en F.D.T.D. à l'aide du logiciel « SimSonic », donc pour le même type de physique que dans le cas précédent, mais cette fois, pour une seule épaisseur de lentille à trois instants différents.

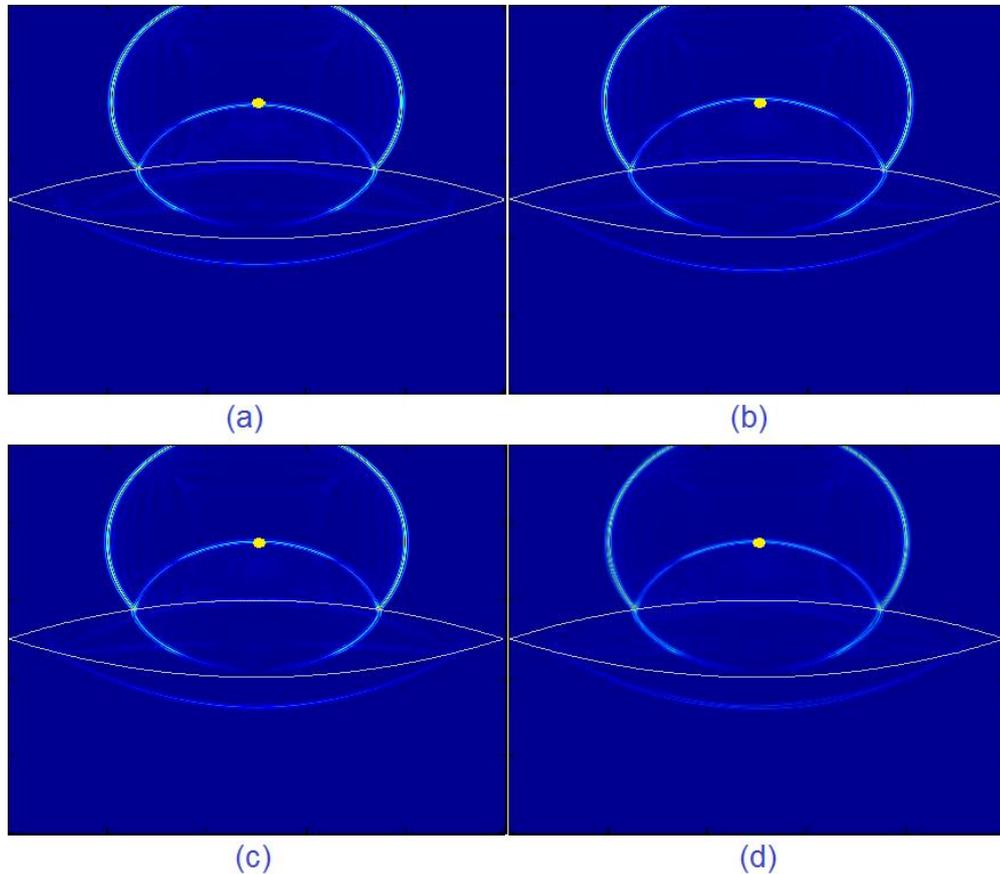


Figure 18 : Lentilles d'épaisseurs $H = 5$ cm en (a), (b), (c) et (d), mais à des instants différents : à $t = 190 \mu\text{s}$ en (a), $t = 200 \mu\text{s}$ en (b), et $t = 195 \mu\text{s}$ en (c) et (d). Il est à noter que ces résultats sont calculés sauf en (d) qui est le résultat du morphing entre (a) et (b). Il semblerait que les résultats (c) et (d) soient assez proches.

Pour ce cas test, le principe est d'appliquer le morphing entre le résultat numérique pour la durée la plus courte et celui relatif à la durée la plus longue, puis de comparer le résultat obtenu par le morphing avec le résultat obtenu par les calculs pour la durée intermédiaire.

Ces troisièmes résultats, à l'image de ceux obtenus précédemment, sont aussi relativement concluants quant à l'efficacité du morphing, et prouvent qu'en changeant de type

Morphing appliqué aux simulations numériques dans le cadre de la recherche en sismologie et de la protection des habitats et édifices.

d'application du morphing, en l'occurrence, en passant de la méthode « spatiale » à la méthode « temporelle », l'efficacité du morphing reste la même.

Enfin, la dernière étape a consisté à tester le morphing selon le troisième type d'application du morphing, à savoir, la méthode « fréquentielle ». Pour ce test, j'ai réalisé trois simulations numériques en F.D.T.D. à l'aide du logiciel « SimSonic », donc pour le même type de physique que dans le cas précédent, mais cette fois, sur une lentille de Luneberg pour une onde source émise à trois fréquences différentes.

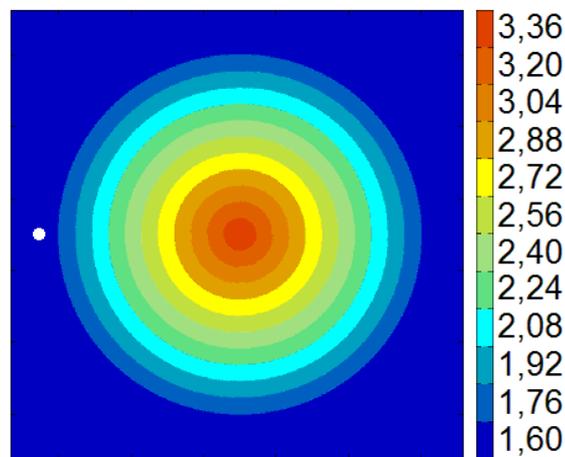


Figure 19 : Lentille de Luneberg constituée de cercles concentriques de densités d'autant plus importantes que ces cercles sont proches du centre de ces cercles. Le cercle rouge, le plus au centre a une densité de $3,36 \text{ t.m}^{-3}$, et le cercle le plus extérieur en bleu foncé a une densité de $1,76 \text{ t.m}^{-3}$. Le milieu extérieur à la lentille a une densité de $1,6 \text{ t.m}^{-3}$. Le point source de l'onde émise est représenté en blanc.

Pour ce dernier cas test, l'idée est d'appliquer le morphing entre le résultat numérique pour la fréquence la plus basse et celui relatif à la fréquence la plus élevée, puis de comparer le résultat obtenu par le morphing avec le résultat obtenu par les calculs pour la fréquence intermédiaire.

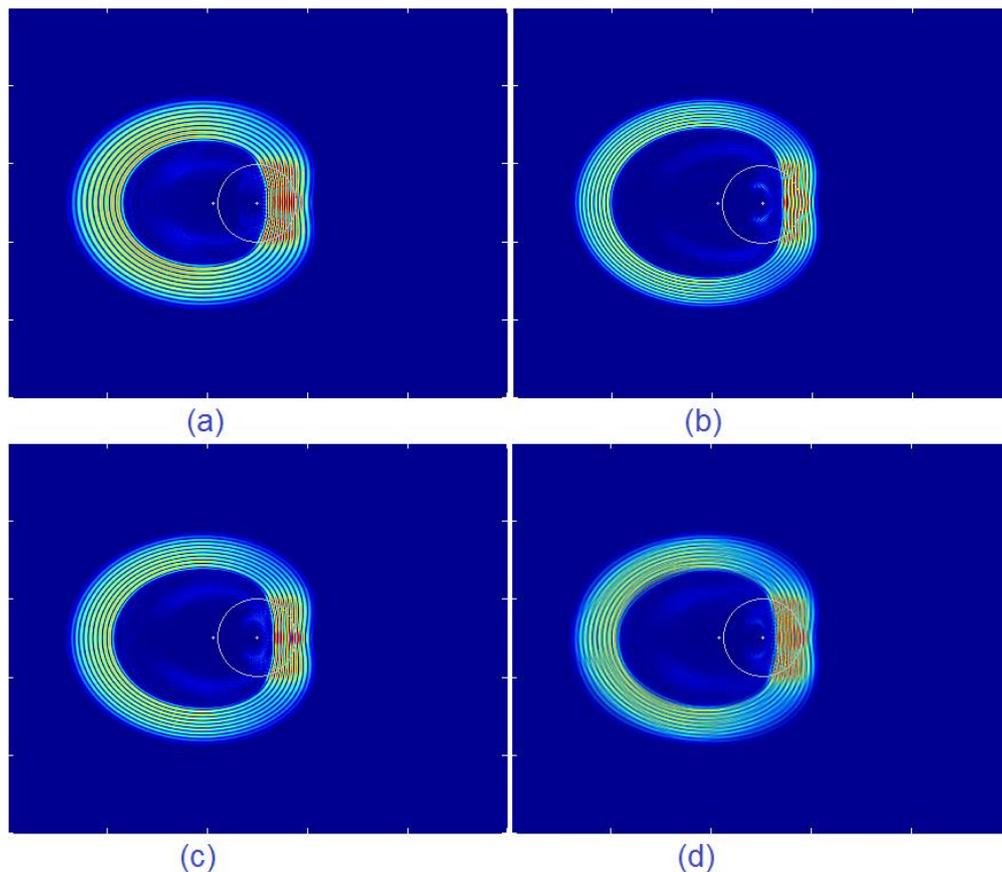


Figure 20 : Ondes au centre émises à $f = 25$ kHz en (a), à $f = 35$ kHz en (b), et à $f = 30$ kHz en (c) et (d). Tous les résultats sont calculés sauf (d) qui représente le morphing entre (a) et (b). Il semblerait que les résultats (c) et (d) soient assez proches.

Ces quatrièmes et derniers résultats sont également relativement concluants quant à l'efficacité du morphing, et montrent qu'en changeant de type d'application du morphing, en l'occurrence, en passant de la méthode « spatiale » ou « temporelle » à la méthode « fréquentielle », l'efficacité du morphing reste identique.

III.5. Mise en œuvre actuelle et future mise en œuvre

Si, à première vue, on peut constater des résultats intéressants par le morphing, il n'en demeure pas moins que la mise en œuvre du morphing sur des résultats de simulations numériques reste assez peu ergonomique. En effet, la gratuité du logiciel « SimSonic », qui procède aux calculs en F.D.T.D. des déplacements d'ondes selon les propriétés physiques configurées, est contrastée par l'obligation d'utiliser un logiciel tel que « Matlab » pour pouvoir procéder aux configurations nécessaires à l'utilisation du logiciel « SimSonic ». De

Morphing appliqué aux simulations numériques dans le cadre de la recherche en sismologie et de la protection des habitats et édifices.

plus, il faut un logiciel de morphing, donc un troisième logiciel, pour pouvoir appliquer le morphing aux images issues des simulations numériques.

Il est à noter que le logiciel « SimSonic » ne fonctionne qu'avec des valeurs numériques sous forme de matrices, alors qu'un logiciel de morphing ne fonctionne qu'avec des images, sans se préoccuper des valeurs numériques. Si le logiciel « Matlab » gère parfaitement les conversions entre les valeurs numériques contenues dans les matrices et les images, il faut toutefois procéder à quelques calculs pour connaître les valeurs numériques d'un résultat obtenu par le biais du morphing. Par exemple, si on veut connaître les coordonnées de certains points sur un résultat obtenu par le morphing, autrement dit, une simple image, il faut appliquer une règle de trois entre les coordonnées de ces points en nombre de pixels et le nombre de pixels par unité de mesure.

Ainsi, il apparaît clairement que la complexité de l'utilisation actuelle du morphing, en l'appliquant sur des simulations numériques, est telle que cette solution ne peut pas être commercialisée en l'état. On peut donc envisager, pour le futur, une solution intégrée proposant l'application du morphing aux simulations numériques comme fonctionnalité supplémentaire d'un logiciel tel que « Matlab », ou encore, une nouvelle application de morphing capable d'intégrer simplement les valeurs numériques sous forme matricielle telles que les produit un logiciel comme « SimSonic ».

A plus long terme, on peut également envisager une version en trois dimensions du morphing, avec des « points de contrôle » ayant des coordonnées en trois dimensions. Dans la mesure où les logiciels de simulations numériques gèrent déjà des maillages tridimensionnels, une telle évolution du logiciel de morphing semble être indispensable.

IV. Résultats et discussion

IV.1. Les résultats obtenus

Jusqu'à présent, dans les résultats obtenus, on n'a pu observer que de fortes ressemblances entre les résultats calculés et les résultats issus du morphing. Autrement dit, du point de vue qualitatif, notre perception visuelle nous incite à croire en une bonne efficacité du morphing,

Morphing appliqué aux simulations numériques dans le cadre de la recherche en sismologie et de la protection des habitats et édifices.

pour autant, cette impression reste parfaitement subjective dans la mesure où elle n'est pas quantifiable. Il apparaît donc clairement que, dans une démarche scientifique, pour pouvoir valider cette « méthode » de travail, il nous est indispensable de mesurer la différence entre les résultats calculés et ceux résultant du morphing.

Le principal obstacle à la réalisation d'une telle mesure est la nature du codage des couleurs. En effet, en répartissant le codage d'une couleur sur ses trois composantes (les trois couleurs primaires en émission : le rouge, le vert, et le bleu), on complique sérieusement l'opération consistant à comparer les couleurs de deux pixels. De fait, cela revient à comparer les quantités de rouge, de vert, et de bleu de chaque pixel... Comment interpréter le taux de similitude entre deux pixels en ayant un pixel qui aurait à la fois plus de rouge, autant de vert, et moins de bleu que le pixel auquel il doit être comparé ? De plus il est indispensable d'avoir une mesure précise de ce taux de similitude entre deux pixels car cette mesure doit être répétée pour l'ensemble des pixels de l'image à comparer.

Par chance, dans le laboratoire dans lequel je travaille, il y a une équipe spécialisée dans le traitement de l'image. Je me suis donc permis de rencontrer un membre de cette équipe, en l'occurrence le Pr Philippe Refregier, pour lui demander si il avait une solution à ce problème. Il m'a communiqué une solution d'une simplicité déconcertante et d'une efficacité redoutable : dans un premier temps il faut homogénéiser les trois composantes des couleurs de chaque pixel, puis, procéder à la soustraction entre les deux images à comparer, et, enfin, mesurer le reste de cette soustraction par le biais d'une norme, en l'espèce, une norme de type L^2 .

Pour adapter une telle norme à une image en dégradés de gris il faut considérer que la couleur d'un pixel est une valeur comprise entre zéro et deux cent cinquante-cinq, étant entendu qu'en dégradés de gris, les composantes rouge, verte et, bleue ont théoriquement la même valeur. Si on applique la norme L^2 à une telle image, composée de « N » pixels, et en prenant « P_i » comme étant la valeur du pixel numéro « i », la formule de cette norme s'écrit alors de la manière suivante :

$$F = \sqrt{\frac{1}{N} \sum_{i=1}^N \left(\frac{P_i}{255} \right)^2}$$

Morphing appliqué aux simulations numériques dans le cadre de la recherche en sismologie et de la protection des habitats et édifices.

Il est à préciser que le résultat d'une racine carrée n'est pas linéaire, autrement dit, l'interprétation du résultat de la norme L^2 nécessite l'utilisation de la bonne échelle de lecture. Ainsi, à partir de l'image d'un carré noir dont je connais les dimensions, j'ai ajouté un petit carré blanc dont j'ai choisi les dimensions de telle sorte qu'elles correspondent à un taux de blanc de 6,25%, et j'ai mesuré la norme L^2 relative à ce pourcentage. J'ai répété ces mesures en ajoutant à chaque fois le même pourcentage de blanc, et j'ai obtenu la courbe suivante, en bleu :

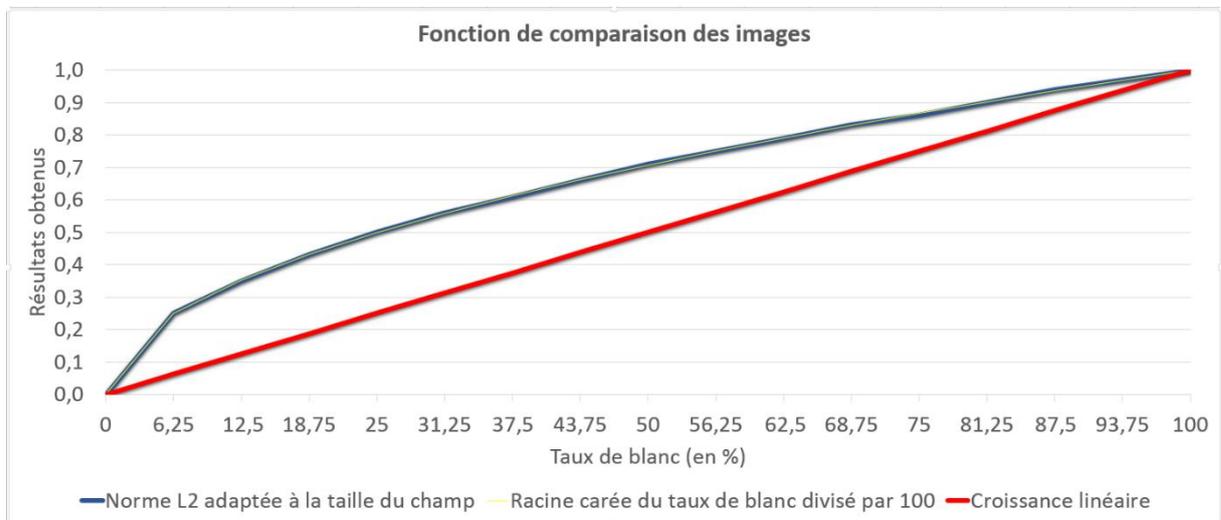


Figure 21 : Résultats de la norme L^2 en fonction du pourcentage de pixels « blancs » présents dans toute l'image.

On remarque que pour cinquante pour cent de blanc dans l'image, la valeur de la norme L^2 est de 0,7... Pour interpréter le résultat d'une norme L^2 il faut donc, à l'aide de la courbe bleue de ce graphique, trouver la correspondance entre le résultat obtenu et le pourcentage de blanc associé à ce résultat.

La première étape, l'homogénéisation, consiste à attribuer une même valeur moyenne à l'ensemble des trois composantes de couleur d'un pixel, puis de répéter cette opération pour l'ensemble des pixels de l'image. Il est à noter que lorsqu'une couleur est composée d'une même quantité de rouge, de vert, et de bleu, alors cette couleur est un gris plus ou moins clair ou foncé, allant du noir si cette quantité est nulle (ou minimum), au blanc si cette quantité est maximum. En réalité, il suffit de convertir les images à comparer en dégradé de gris pour procéder à l'homogénéisation des couleurs.

Morphing appliqué aux simulations numériques dans le cadre de la recherche en sismologie et de la protection des habitats et édifices.

La deuxième étape, la soustraction d'image, consiste à faire la différence entre les valeurs des pixels à comparer, et cela, pour l'ensemble des pixels des images. Un logiciel tel que « Gimp » possède une fonction de soustraction d'image. L'image de différence entre les deux images est également une image en dégradé de gris avec cette spécificité d'avoir des pixels d'autant plus noirs que les pixels comparés sont identiques et des pixels d'autant plus blancs que les pixels comparés sont différents.

La troisième étape, la norme L^2 , pour quantifier le taux moyen de blanc sur l'ensemble de l'image de différence, consiste à calculer la racine carrée de la somme des carrés des valeurs (entre zéro et un) des pixels divisée par le nombre total de pixels. Précisons que dans les cas particuliers où les données significatives n'occupent pas l'ensemble du champ (donc de l'image), il faut impérativement « normaliser » la norme L^2 , c'est-à-dire diviser le résultat obtenu pour la norme L^2 de l'image de différence par le résultat de la norme L^2 obtenu pour l'image homogénéisée du résultat calculé pour le cas intermédiaire (à savoir, celui à comparer avec le résultat obtenu par le morphing). Il n'y a pas, à ma connaissance, de logiciel qui procède à un tel calcul, aussi j'ai développé une application en langage C, dont le détail se trouve en annexe III, pour réaliser ce calcul. Cette application reste toutefois assez rudimentaire : elle ne fonctionne que sur les images au format bitmap codées sur vingt-quatre bits, avec un nom de fichier codé en « dur », pour l'image à mesurer, le calcul est réalisé sur chacune des trois composantes des couleurs, etc...

A l'usage, cette méthode de quantification du taux d'erreur (ou de différence entre les images) s'est révélée être impitoyable, y compris pour les taux d'erreurs modérés, et parfois même pour des résultats qui, à l'œil nu, semblaient être très satisfaisants. Pour exemple, si on duplique une image relativement hétérogène et que dans la copie on décale l'ensemble de l'image d'un pixel vers la droite, la norme L^2 nous indiquera que les deux images sont pratiquement totalement différentes, alors qu'à l'œil nu, on verra le contraire. Il en est de même si, au lieu de décaler l'image dans la copie, on y modifie le contraste ou la luminosité. Pour pallier à ce problème des chercheurs spécialisés en traitement de l'image ont mis au point une méthode nommée « Structural SIMilarity »¹⁶ (S.SIM.). Ceci étant, cette méthode n'est pas reconnue par les physiciens : ils lui préfèrent la mesure par la norme L^2 qui correspond à une quantité mesurable, l'énergie d'un champ.

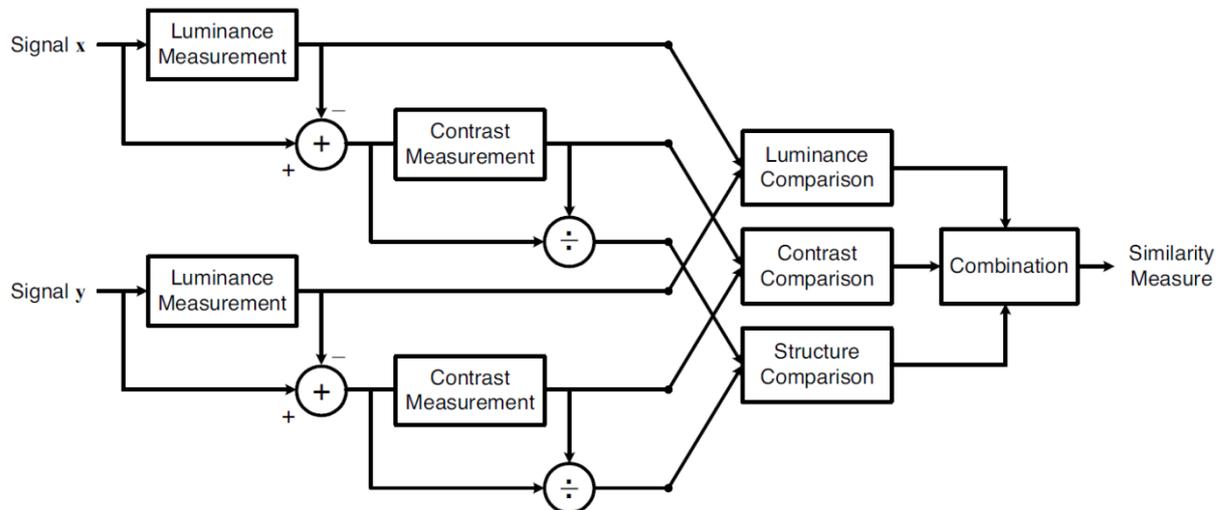


Figure 22 : Le diagramme de fonctionnement de la mesure S.SIM.¹⁶ montre que pour comparer une zone d'image « x » à une zone d'image « y » il y a trois critères de mesure, à savoir, la luminosité, le contraste, et la structure, et que cette dernière est considérée comme une combinaison de luminosité et de contraste.

IV.2. Validations des résultats

Si de manière qualitative, sur les résultats présentés jusqu'à présent, la pertinence du morphing appliqué aux simulations numériques paraît évidente, il reste toutefois indispensable d'obtenir la mesure quantitative des marges d'erreurs pour pouvoir valider ces résultats. Ainsi, en utilisant à la fois la norme L^2 et la méthode S.SIM. j'ai obtenu de telles mesures pour chacune des configurations testées, et ces mesures apportent la validation nécessaire aux résultats obtenus.

Tout d'abord, en utilisant la méthode « spatiale » du morphing, et après avoir converti en dégradés de gris les images des résultats des simulations numériques, avant d'en extraire les images de différences, j'ai procédé aux calculs des normes L^2 , aussi bien sur les résultats obtenus par la méthode F.D.T.D. que par la méthode des éléments finis. En parallèle, pour chacun de ces cas, sur les images d'origine (en couleur), j'ai procédé à la mesure selon la méthode S.SIM. J'ai commencé par la méthode F.D.T.D., dont le résultat se trouve dans la figure 23.

Morphing appliqué aux simulations numériques dans le cadre de la recherche en sismologie et de la protection des habitats et édifices.

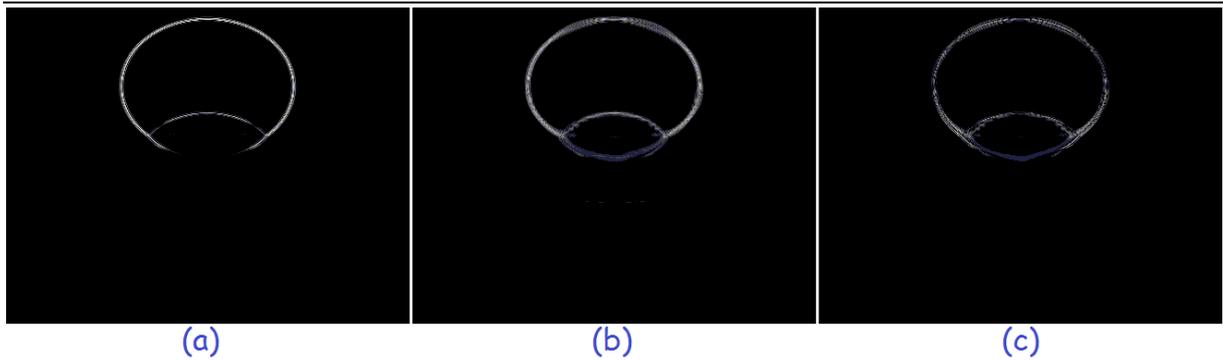


Figure 23 : Figure 17(c) en dégradés de gris en (a), Figure 17(d) en dégradés de gris en (b), en (c) l'image de différence entre (a) et (b).

En calculant la norme L^2 sur l'image de différence en Figure 23(c), on obtient un résultat de 0,036123 pour la composante bleue, 0,035465 pour la composante verte, et 0,035992 pour la composante rouge. Ces petits écarts entre les composantes s'expliquent par l'homogénéisation imparfaite réalisée par la conversion des images originales en images en dégradés de gris. Cette homogénéisation est imparfaite dans la mesure où les trois composantes des couleurs n'ont pas systématiquement strictement la même valeur : il peut y avoir de petits écarts que nous retrouvons, par la suite, dans le calcul des normes L^2 . En se reportant sur le graphique de la Figure 21, on constate que ces valeurs nous indiquent une erreur de l'ordre de 1%.

Par la méthode S.SIM. on obtient la valeur 0,9878 qui indique une erreur de 1,22 %.

Attention, nous sommes là dans un cas particulier où les données significatives n'occupent pas l'ensemble du champ (de l'image), il faut donc « normaliser » ces résultats pour obtenir le véritable taux d'erreur. Si l'exemple suivant illustre un cas plus général, dans lequel les données significatives remplissent le champ (l'image), en revanche, les deux cas suivants, représentés par les figures 25 et 26, sont, à l'image de l'exemple montré par la figure 23, des cas particuliers qui nécessitent une « normalisation » de la norme L^2 .

En utilisant ensuite la méthode des éléments finis pour des calculs basés sur les équations de l'électromagnétisme, j'ai également testé le morphing selon la méthode « spatiale » dont voici, à présent, les valeurs quantitatives du taux d'erreur.

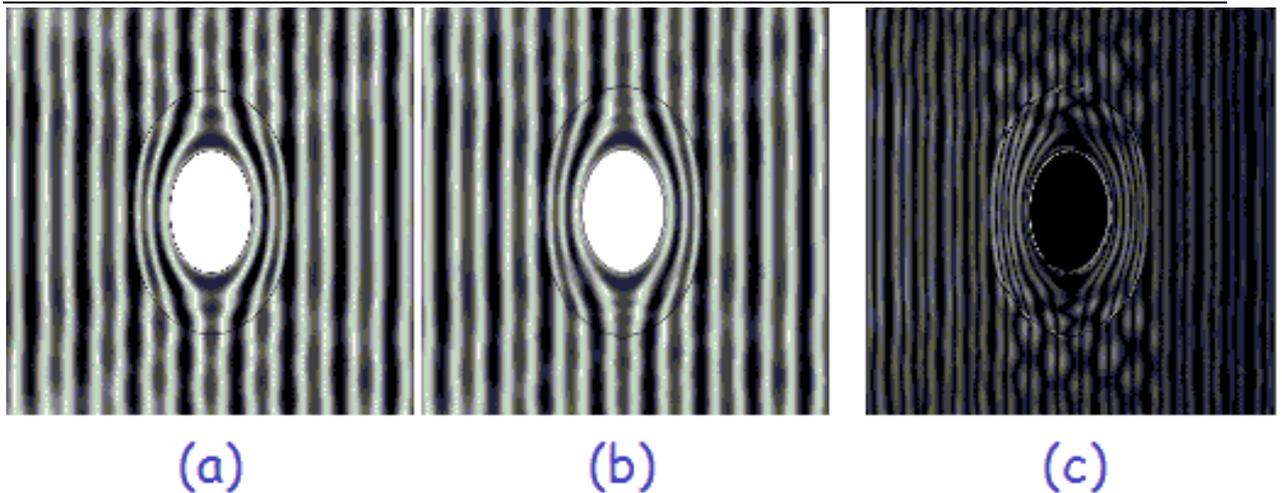


Figure 24 : Figure 15(c) en dégradés de gris en (a), Figure 15(d) en dégradés de gris en (b), en (c) l'image de différence entre (a) et (b).

En calculant la norme L^2 sur l'image de différence en Figure 24(c), on obtient un résultat de 0,201976 pour la composante bleue, 0,197193 pour la composante verte, et 0,196575 pour la composante rouge. En se reportant sur le graphique de la Figure 21, on constate que ces valeurs nous indiquent une erreur de l'ordre de 5%.

Là où cela devient curieux, c'est que par la méthode S.SIM. on obtient la valeur 0,7953 qui indique une erreur de 20,47 %... On ne peut alors que se féliciter de ce que la communauté des physiciens ne reconnaisse que la norme L^2 comme méthode valable de quantification. Plus sérieusement, on peut expliquer un tel écart par le choix des couleurs dans les images d'origine. En effet, les amplitudes minimum sont représentées par des rayures bleues et les amplitudes maximum par des rayures rouges, donc on a un fort contraste entre les couleurs de ces images. Dans la mesure où la méthode S.SIM. prend en compte le contraste comme critère pour calculer la différence (ou la similitude) entre deux images, et que les images dont il est question sont fortement contrastées, alors on peut penser que le résultat surprenant obtenu par la méthode S.SIM. vient du choix des couleurs. Si ces simulations numériques avaient été réalisées avec des amplitudes moindres, par exemple avec une amplitude maximum représentée en couleur jaune et une amplitude minimum représentée en couleur verte, alors il est très probable que la méthode S.SIM. nous donnerait un résultat beaucoup plus favorable. Rappelons que nous sommes dans le cas de la méthode « spatiale » du morphing, et qu'en conséquence il ne s'applique que sur la géométrie de la cape d'invisibilité.

Morphing appliqué aux simulations numériques dans le cadre de la recherche en sismologie et de la protection des habitats et édifices.

Ensuite, en utilisant la méthode « temporelle » du morphing, et après avoir converti en dégradés de gris les images des résultats des simulations numériques, avant d'en extraire les images de différences, j'ai procédé au calcul de la norme L^2 , et à la mesure du taux d'erreur selon la méthode S.SIM.

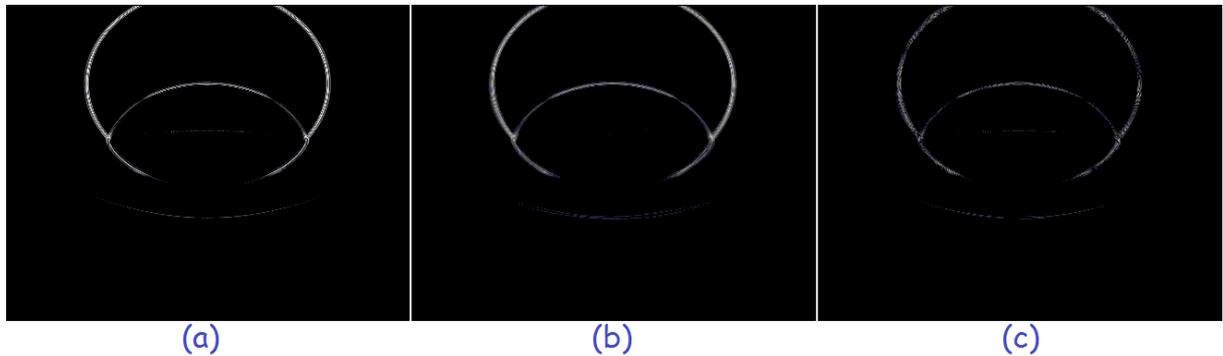


Figure 25 : Figure 18(c) en dégradés de gris en (a), Figure 18(d) en dégradés de gris en (b), en (c) l'image de différence entre (a) et (b).

En calculant la norme L^2 sur l'image de différence en Figure 25(c), on obtient un résultat de 0,049917 pour la composante bleue, 0,047663 pour la composante verte, et 0,048029 pour la composante rouge. En se reportant sur le graphique de la Figure 21, on constate que ces valeurs nous indiquent une erreur de l'ordre de 1%.

Par la méthode S.SIM. on obtient la valeur 0,9921 qui indique une erreur de 0,0079 %, mais ces résultats, pour être précis, doivent être « normalisés ».

Enfin, en utilisant la méthode « fréquentielle » du morphing, et après avoir converti en dégradés de gris les images des résultats des simulations numériques, avant d'en extraire les images de différences, j'ai procédé au calcul de la norme L^2 , et à la mesure du taux d'erreur selon la méthode S.SIM.

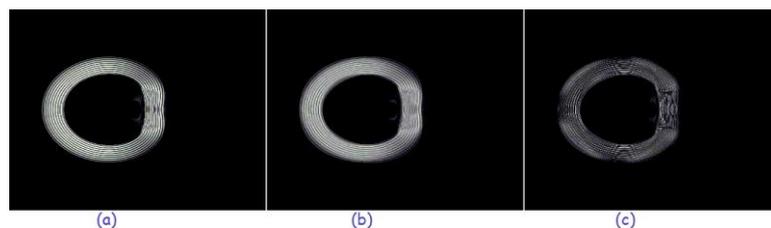


Figure 26 : Figure 20(c) en dégradés de gris en (a), Figure 20(d) en dégradés de gris en (b), en (c) l'image de différence entre (a) et (b).

En calculant la norme L^2 sur l'image de différence en Figure 26(c), on obtient un résultat de 0,066305 pour la composante bleue, 0,067096 pour la composante verte, et 0,066935 pour la composante rouge. En se reportant sur le graphique de la Figure 21, on constate que ces valeurs nous indiquent une erreur de l'ordre de 2%.

Par la méthode S.SIM. on obtient la valeur 0,9431 qui indique une erreur de 5,69 %, mais, encore une fois, ces résultats, pour être précis, doivent être « normalisés ».

IV.3. Limites de la méthode du « morphing »

Si jusqu'à présent je n'ai présenté que les configurations favorables à l'application du morphing aux simulations numériques, il reste néanmoins indispensable de chercher les cas limites, ou les configurations les plus défavorables à une telle application du morphing.

En partant du fonctionnement même du morphing, à savoir, pour chacun des pixels de l'image, établir une correspondance entre les coordonnées dans l'image « source » d'un pixel et celles que ce pixel devra avoir dans l'image de « destination », puis, établir l'équation de droite passant par ces deux points (ou pixels) pour connaître l'ensemble des coordonnées intermédiaires de ce pixel dans chacune des images intermédiaires, alors on peut penser que si le phénomène physique ne se propage pas de manière aussi linéaire que l'ensemble des points issus de cette équation de droite reliant le point de départ (ou le pixel dans l'image « source ») au point d'arrivée (le pixel dans l'image de « destination »), on aura un écart, un décalage, entre le résultat calculé et le résultat obtenu par le morphing. Par exemple, si le phénomène physique se comporte comme le scintillement d'une étoile, ou un cercle qui, alternativement, se dilaterait et se compresserait, alors il est probable que le morphing ne soit pas efficace, simplement parce qu'il suit une progression linéaire.

Pour illustrer un tel exemple, j'ai testé deux configurations de deux phénomènes physiques non linéaires, et même, non monotones.

Le premier test a été réalisé sur ce qu'on appelle un « super diffuseur », un phénomène physique particulièrement dispersif. La simulation numérique de ce test a été réalisée selon les

équations de l'électromagnétisme en utilisant la méthode des éléments finis, et en utilisant la méthode « spatiale » du morphing.

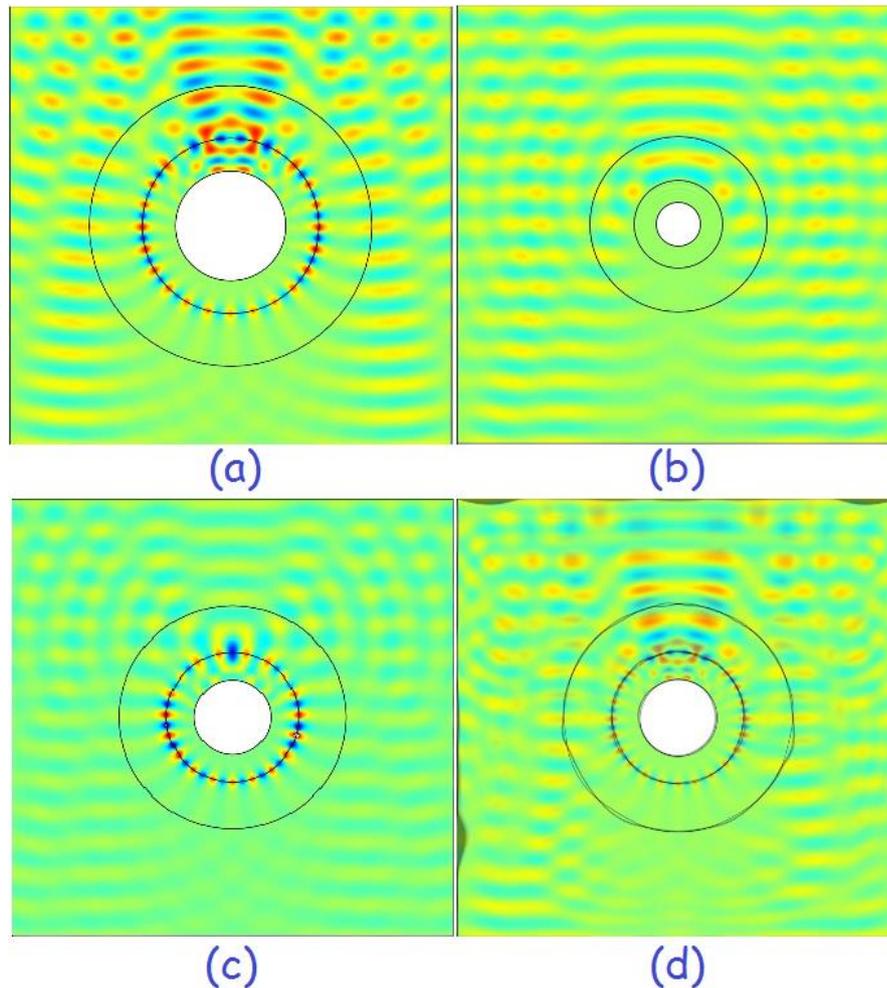


Figure 27 : « Super diffuseur » de rayon le plus élevé en (a), de rayon le plus bas en (b), de rayon intermédiaire en (c) et (d). Tous les résultats sont calculés sauf celui en (d) qui représente le morphing entre (a) et (b). A l'œil nu, on remarque qu'il y a peu de ressemblance entre (c) et (d).

A l'œil nu, on constate déjà que le résultat du morphing pour le cercle de taille intermédiaire n'a que peu de ressemblances avec le résultat obtenu par le calcul pour un tel cercle. La mesure quantitative ne fait que confirmer cette constatation.

Morphing appliqué aux simulations numériques dans le cadre de la recherche en sismologie et de la protection des habitats et édifices.

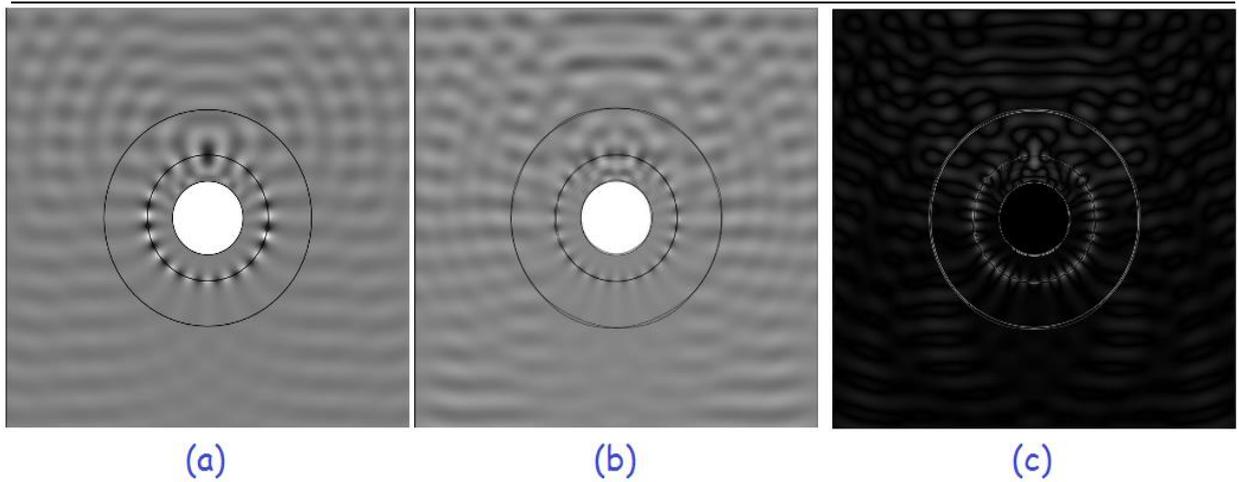


Figure 28 : Figure 27(c) en dégradés de gris en (a), Figure 27(d) en dégradés de gris en (b), en (c) l'image de différence entre (a) et (b).

En calculant la norme L^2 sur l'image de différence en Figure 28(c), on obtient un résultat de 0,502722 pour la composante bleue, 0,504186 pour la composante verte, et 0,504178 pour la composante rouge. En se reportant sur le graphique de la Figure 21, on constate que ces valeurs nous indiquent une erreur de l'ordre de 25%.

Par la méthode S.SIM. on obtient la valeur 0,7501 qui indique une erreur de 24,99 %.

Le second test a été réalisé par des simulations numériques en F.D.T.D., selon les équations de l'élastodynamique, toujours à l'aide de la méthode « spatiale » du morphing. En l'occurrence, on génère une onde circulaire au centre de gravité d'un triangle isocèle dont l'intérieur a une densité dix fois plus faible que celle du milieu extérieur. On reproduit trois fois cette simulation numérique, pour trois hauteurs (verticales) différentes.

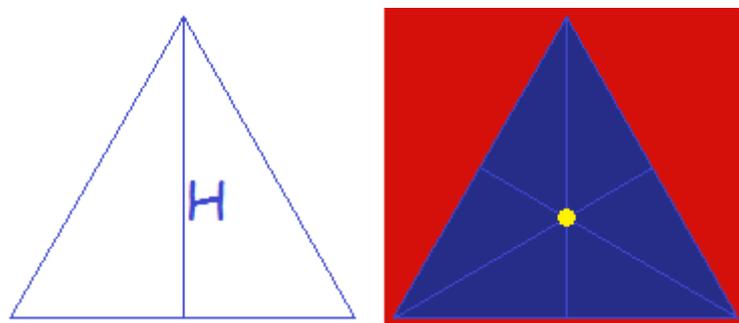


Figure 29 : Triangle équilatéral de hauteur H. En jaune, le point source des ondes émises. La longueur de la hauteur H sera modifiée pour obtenir différents triangles isocèles, toutefois, le point source des ondes émises restera toujours au centre de gravité des triangles isocèles.

L'écart entre les densités interne et externe du triangle doit être assez important pour casser la linéarité de la propagation de l'onde. Ensuite on applique le morphing entre le résultat pour le triangle ayant la plus petite hauteur, et le résultat pour le triangle ayant la plus grande hauteur. Après, on compare le résultat du morphing avec celui obtenu pour le triangle de hauteur intermédiaire.

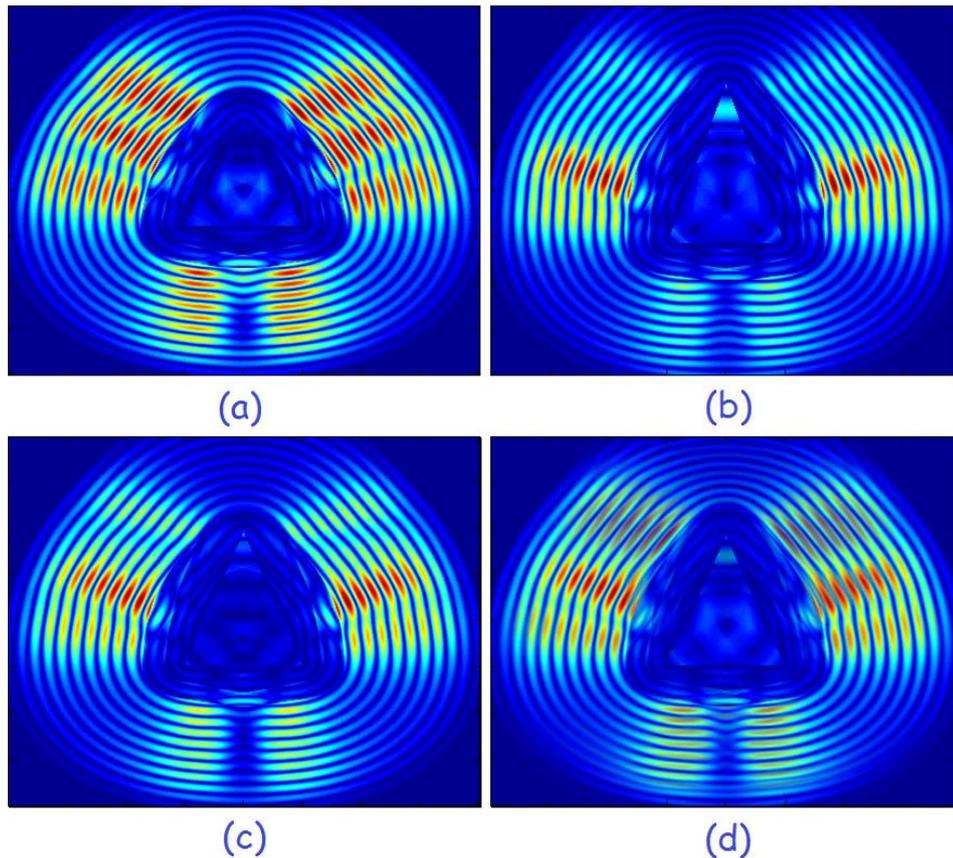


Figure 30 : Si H est la longueur de la hauteur du triangle équilatéral, alors on a une hauteur de $5/3 \times H$ en (a), de $2 \times H$ en (b), et de $11/6 \times H$ en (c) et (d). Tous les résultats sont calculés sauf en (d) qui représente le résultat du morphing entre (a) et (b). A l'œil nu on remarque des différences entre (c) et (d), mais il serait difficile de prétendre que ces différences soient importantes...

Morphing appliqué aux simulations numériques dans le cadre de la recherche en sismologie et de la protection des habitats et édifices.

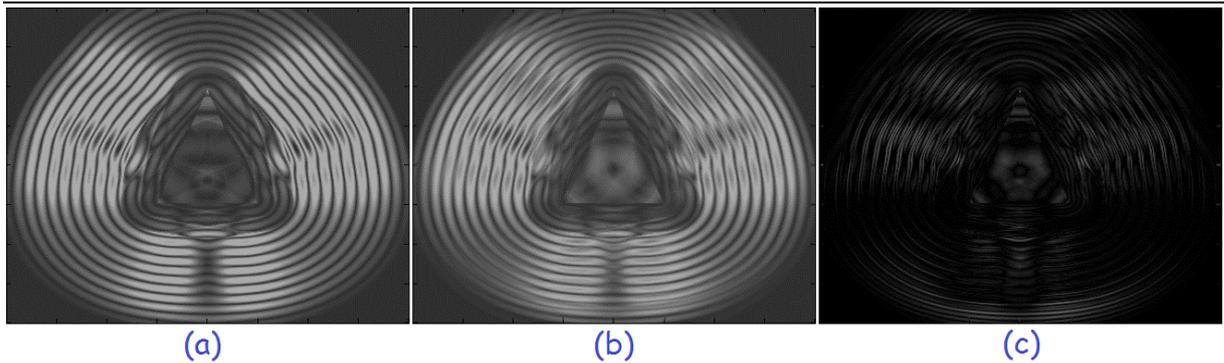


Figure 31 : Figure 30(c) en dégradés de gris en (a), Figure 30(d) en dégradés de gris en (b), en (c) l'image de différence entre (a) et (b).

Si à l'œil nu, de manière qualitative, on pourrait penser avoir un bon résultat par le morphing, la mesure quantitative apporte implacablement la contradiction.

En calculant la norme L^2 sur l'image de différence en Figure 31(c), on obtient un résultat de 0,502601 pour la composante bleue, 0,504896 pour la composante verte, et 0,504871 pour la composante rouge. En se reportant sur le graphique de la Figure 21, on constate que ces valeurs nous indiquent une erreur de l'ordre de 25%.

Par la méthode S.SIM. on obtient la valeur 0,7361 qui indique une erreur de 26,39 %.

IV.4. Intérêts de la méthode du « morphing » et exploitation des résultats

Très clairement, avant de commencer ce projet on se posait la question de l'efficacité, de la pertinence des résultats générés par le morphing. On se disait alors qu'il y avait trois possibilités : soit le morphing était totalement hors sujet, soit il fournissait des résultats approximatifs, soit il déterminait les résultats exacts.

A travers les tests réalisés, on peut dire que, hormis les cas extrêmes de phénomènes physiques non linéaires, ou, au pire, non monotones, la méthode du morphing donne une idée assez proche (sans être parfaitement exacte) du résultat tel qu'il aurait pu être obtenu par les calculs.

De fait, cette méthode peut être utilisée pour orienter les recherches dès lors que nous sommes capables de délimiter un intervalle de valeurs dans lequel se trouve la solution, et que

Morphing appliqué aux simulations numériques dans le cadre de la recherche en sismologie et de la protection des habitats et édifices.

l'équation à résoudre reste sensiblement linéaire. Outre cet intérêt, cette méthode présente également l'avantage de réduire considérablement les temps de calculs. En effet, plus le maillage est fin, plus le nombre de paramètres à prendre en compte est élevé, autrement dit, plus le résultat attendu doit être précis, et plus le temps de calcul est important. Par ailleurs, la méthode du morphing ne s'embarrasse pas de toutes ces contraintes, et ne nécessite donc que quelques minutes pour être mise en œuvre. Il apparaît alors assez clairement qu'un gain de temps substantiel peut être obtenu en utilisant la méthode du morphing. Le dernier intérêt de cette méthode réside dans l'économie en ressources informatiques, donc dans l'investissement en matériel. En effet, il n'est pas besoin d'importantes ressources informatiques pour exécuter un logiciel de morphing : une simple tablette, ou même un smartphone, suffisent. Autrement dit, grâce à cette méthode, il n'est plus besoin d'investir, par exemple, trente mille euros dans l'achat d'un centre de calcul, mais seulement quelques centaines d'euro pour l'achat d'un smartphone...

A ce jour, l'ensemble des tests réalisés ne l'ont été que sur des cas théoriques, et uniquement dans l'objectif de mettre à l'épreuve cette nouvelle utilisation du morphing, afin d'en valider le principe. En d'autres termes, il n'y a pas encore d'exploitation des résultats obtenus par cette méthode.

v. Conclusion

v.1. Applications industrielles et intérêt économique

Il n'y a pas encore d'application industrielle de la méthode du morphing, toutefois, cette méthode a fait l'objet d'un dépôt de brevet, tel qu'on peut le constater en annexe I. Pour aboutir à la rédaction de ce brevet, il m'a d'abord fallu expliquer l'idée, puis, après vérification de l'absence d'antériorité (quant à l'existence d'un tel brevet), il m'a fallu participer activement à la rédaction de ce brevet en relisant et en corrigeant ce qui avait été écrit.

Pour tout dire, même si le brevet a été déposé, aujourd'hui, l'utilisation du morphing appliqué aux simulations numériques ne peut pas être commercialisée en l'état : cette utilisation n'est

Morphing appliqué aux simulations numériques dans le cadre de la recherche en sismologie et de la protection des habitats et édifices.

pas du tout ergonomique dans la mesure où l'ensemble des logiciels à manipuler n'ont pas été développés pour fonctionner avec un logiciel de morphing.

Pour autant, nous avons vu les intérêts d'une telle méthode, donc la nécessité de développer une application, pour interfacer de manière simple la méthode du morphing avec les simulations numériques, apparaît clairement. Le développement d'une telle application n'est possible qu'à partir d'un certain investissement, et, actuellement, la cellule de valorisation du C.N.R.S., la Société d'Accélération du Transfert de Technologies (la S.A.T.T.), est à la recherche de ces fonds, tel qu'on peut le constater sur la plaquette « marketing » en annexe II.

A terme, l'objectif est de créer une start-up à l'aide de l'investissement obtenu, puis de développer cette application de sorte à pouvoir industrialiser la méthode du morphing.

L'intérêt économique est double : un gain de temps et une économie de ressources informatiques pour les utilisateurs, et la création d'une start-up, donc d'emplois, pour ce qui me concerne.

V.2. Industrialisation et coût de la méthode du « morphing »

La prochaine étape est l'industrialisation de la méthode du morphing. Cette étape se décompose en une étude de marché, une recherche d'investissements, la création d'une entreprise avec ses aspects juridiques et comptables, etc... Il apparaît donc clairement que l'industrialisation requiert des compétences, des connaissances, un savoir-faire dont je ne dispose pas personnellement. C'est pour cette raison que je délègue ce travail à la S.A.T.T. qui emploie des spécialistes dans chacun des sous domaines de cette étape.

En ce qui concerne le coût financier de cette méthode, à ce jour il est presque nul dans la mesure où le logiciel de morphing utilisé est un logiciel libre. En revanche, pour ce qui est du coût en temps de manipulations, cette méthode nécessite de cinq à dix minutes, et un peu plus de temps si on utilise beaucoup de « points de contrôle » pour obtenir un résultat plus précis. Bien entendu, ces quelques minutes sont négligeables au regard du nombre d'heures de calculs nécessaires à la réalisation d'une simulation numérique moyennement complexe.

Morphing appliqué aux simulations numériques dans le cadre de la recherche en sismologie et de la protection des habitats et édifices.

A terme, lorsque l'application aura été développée, elle aura un coût nécessairement plus élevé que celui d'un logiciel libre, mais la simplicité de son utilisation, son ergonomie, rendra cette méthode plus accessible, et devrait connaître, je l'espère, un certain succès.

V.3. Perspectives d'évolutions techniques et applicatives

La principale évolution technique devrait porter sur la troisième dimension. En effet, jusqu'à présent je n'ai testé que le morphing en deux dimensions sur des simulations numériques en deux dimensions, ou des simulations numériques en trois dimensions dont j'ai extrait une « tranche » en deux dimensions.

L'aspect prédictif d'un taux d'erreur devrait également être une évolution technique à envisager. Si entre deux résultats numériques on peut assez facilement deviner le résultat que produira le morphing, en revanche, il est bien plus difficile d'obtenir par une méthode de calculs, une estimation du résultat intermédiaire, tel qu'on devrait l'avoir en effectuant la simulation numérique. Rappelons que le taux d'erreur se mesure entre le résultat du morphing et celui obtenu par les calculs. Autrement dit, déterminer un taux d'erreur de manière prédictive, implique l'obtention d'une estimation du résultat du morphing ainsi que celui issu des calculs, ce qui n'est pas une mince affaire.

La troisième évolution technique devrait porter sur une quatrième méthode d'utilisation du morphing. En effet, jusqu'alors on a vu les méthodes « spatiale », « temporelle », et « fréquentielle » du morphing, on pourrait maintenant envisager une méthode « physique ». Le principe consisterait à ne modifier qu'un paramètre physique avant de procéder aux simulations numériques. Prenons l'exemple de la densité en élastodynamique, on aurait alors un résultat calculé pour la densité la plus faible, un résultat calculé pour la densité la plus élevée, puis, par le morphing, on pourrait obtenir les résultats pour toutes les densités intermédiaires sans avoir à calculer tous les résultats intermédiaires.

En tenant compte du fonctionnement du morphing, il semble évident que le champ des perspectives d'évolutions applicatives est assez vaste. Si on admet que toutes les équations linéaires sont susceptibles d'être compatibles avec la méthode du morphing, alors les nouvelles applications pourront aller bien au-delà de la physique, qu'elle soit sismique ou

Morphing appliqué aux simulations numériques dans le cadre de la recherche en sismologie et de la protection des habitats et édifices.

optique. En fait, cette méthode pourrait fonctionner dans des domaines aussi divers que la biochimie, la médecine, ou même, la finance.

Pour tout dire, j'ai rencontré le Pr Conrad Becker, qui est biochimiste, pour lui présenter la méthode du morphing et il était assez intéressé, notamment par la méthode « temporelle ». De plus, à partir du mois de janvier prochain, je travaillerai sur un autre projet de recherche, dans le domaine de la cancérologie, où il devrait y avoir de nouvelles évolutions applicatives.

Enfin, dans le domaine de la finance, le modèle de Blakes-Scholes, destiné à évaluer des valeurs boursières à une date donnée, devrait pouvoir être simplifié par l'utilisation du morphing. Imaginons une représentation de graphique de différentes valeurs boursières avec chacun des taux de changes pour une première date, ainsi qu'une seconde représentation graphique des mêmes valeurs boursières avec leurs taux de changes à une date plus éloignée, alors on pourrait déterminer par le morphing les taux de change de chacune de ces valeurs boursières pour toutes les dates intermédiaires entre les deux dates pour lesquelles on a procédé aux calculs.

Annexe I

Morphing appliqué aux simulations numériques dans le cadre de la recherche en sismologie et de la protection des habitats et édifices.



15 rue des Minimes - CS 50001 - 92677 Courbevoie Cedex

Pour vous informer : INPI Direct 0820 210 211

Pour déposer par télécopie : 33 (0)1 56 65 86 00

BREVET D'INVENTION

Code de la propriété intellectuelle - Livre VI



DÉSIGNATION D'INVENTEUR(S)

Vos références pour ce dossier	ICG20441
N° D'ENREGISTREMENT NATIONAL	
TITRE DE L'INVENTION	
Titre	PROCÉDÉ DE DÉTERMINATION DES VALEURS D'UN PHÉNOMÈNE PHYSIQUE DANS UN MILIEU
LE(S) DEMANDEUR(S)	Centre National De la Recherche Scientifique, Université d'Aix-Marseille, Ecole Centrale de Marseille
DÉSIGNE(NT) EN TANT QU'INVENTEUR(S)	
INVENTEUR 1	
Nom	AZNAVOURIAN
Prénom	John
Rue	25 rue de Cuques Bâtiment E Les Romarins
Code postal et ville	13100 AIX-EN-PROVENCE
Pays	FR
INVENTEUR 2	
Nom	GUENNEAU
Prénom	Sébastien
Rue	71 rue du Coteau
Code postal et ville	13007 MARSEILLE
Pays	FR
DATE ET SIGNATURE	
Signé par	
Date	
Signataire	Mandataire

Conformément aux dispositions de la loi n° 78-17 du 6.01.1978 modifiée relative à l'informatique, aux fichiers et aux libertés, vous bénéficiez d'un droit d'accès et de rectification pour les données vous concernant auprès de l'INPI. Les données à caractère personnel que vous êtes tenu(e) de nous fournir dans ce formulaire sont exclusivement utilisées pour identifier le titulaire de la demande et son éventuel mandataire.

Page 1/1



BREVET D'INVENTION
CERTIFICAT D'UTILITE

Réception électronique de la soumission

Il est certifié par la présente qu'une demande de brevet (ou d'un certificat d'utilité) a été reçue par le biais du dépôt électronique sécurisé de l'INPI. Après réception, un numéro d'enregistrement et une date de réception ont été automatiquement attribués.

Numéro de demande	1555070	
Numéro de soumission	1000296382	
Date de réception	03 juin 2015	
Vos références	ICG20441	
Demandeur	Centre National De la Recherche Scientifique	
Pays	FR	
Titre de l'invention	PROCÉDÉ DE DÉTERMINATION DES VALEURS D'UN PHÉNOMÈNE PHYSIQUE DANS UN MILIEU	
Documents envoyés	package-data.xml application-body.xml requetefr.pdf (4 p.) comment.pdf (2 p.) design.pdf (1 p.) textebrevet.pdf (27 p.) redtax-1.pdf (1 p.)	requetefr.xml fr-fee-sheet.xml validation-log.xml indication-bio-deposit.xml fr-office-specific-info.xml dessins.pdf (4 p.) redtax-2.pdf (1 p.)
Déposé par	EMAIL=gestion@innov-group.com,CN=Michel COLOMBO,O=CABINET BREVINNOV,C=FR	
Méthode de dépôt	Dépôt électronique	
Date et heure de réception électronique	03 juin 2015, 19:18:04 (CEST)	
Empreinte officielle du dépôt	16:D1:99:D6:04:55:32:8A:1D:6B:25:BF:B5:1D:65:03:DF:D1:F2:0E	

/INPI, section dépôt/

**PROCÉDÉ DE DÉTERMINATION DES VALEURS D'UN PHÉNOMÈNE PHYSIQUE
DANS UN MILIEU**

L'invention concerne un procédé de détermination des valeurs d'un phénomène physique dans un milieu. L'invention concerne également un support d'enregistrement d'informations et un calculateur pour mettre en œuvre ce procédé.

On connaît des modèles physiques qui permettent de déterminer des valeurs $U(\underline{X})$ d'un phénomène physique dans un milieu en différents points repérés chacun par leurs coordonnées \underline{X} . Par exemple, un phénomène physique est modélisé par un modèle physique linéaire comportant un paramètre p dont la valeur est indépendante des coordonnées \underline{X} . Chaque valeur $U(\underline{X})$ est la solution d'un système d'équations linéaires qui relie entre elles les coordonnées \underline{X} d'un point du milieu, le paramètre p et la valeur $U(\underline{X})$ du phénomène physique en ce point. On calcule ainsi les valeurs $U(\underline{X})$ pour différentes coordonnées \underline{X} dans le milieu, en résolvant ces systèmes d'équations linéaires. Cette résolution est typiquement réalisée au moyen de calculateurs électroniques.

Un inconvénient de ces procédés est que, pour des phénomènes physiques complexes, la résolution des systèmes d'équations du modèle est coûteuse en temps de calcul et en ressources informatiques. Si on souhaite déterminer la valeur $U(\underline{X})$ pour différentes valeurs du paramètre p , il est nécessaire, pour chacune des valeurs de p , de résoudre les systèmes d'équations du modèle pour toutes les valeurs des coordonnées \underline{X} . Cela nécessite un temps de calcul élevé et mobilise des ressources informatiques importantes.

Il existe donc un besoin pour un procédé de détermination des valeurs d'un phénomène physique dans un milieu, au moyen d'un modèle linéaire fonction d'un paramètre p variable, ce procédé pouvant être mis en œuvre avec un temps de calcul réduit et avec des ressources informatiques limitées.

L'invention concerne donc un procédé de détermination des valeurs $U(\underline{X})$ d'un phénomène physique dans un milieu, ce phénomène physique étant modélisé par un modèle physique linéaire, de sorte que chaque valeur $U(\underline{X})$ soit la solution d'un système d'équations linéaires qui relie entre elles les coordonnées \underline{X} d'un point du milieu, la valeur $U(\underline{X})$ du phénomène physique en ce point et un paramètre p du modèle, la valeur du paramètre p étant indépendante des coordonnées \underline{X} , ce procédé comportant :

a) le calcul automatique de valeurs $U(\underline{X})$ du phénomène physique pour une première valeur A du paramètre, ce calcul comportant la résolution du système d'équations avec la première valeur A du paramètre, pour calculer des valeurs $U(\underline{X})$ en différents points du milieu,

Morphing appliqué aux simulations numériques dans le cadre de la recherche en sismologie et de la protection des habitats et édifices.

b) la construction d'une image numérique de départ du phénomène physique, formée d'une pluralité de pixels, dans laquelle :

- la position de chaque pixel est reliée, par une première relation prédéfinie, aux coordonnées \underline{X} d'un point du milieu pour lequel une valeur $U(\underline{X})$ a été calculée lors de l'étape a), et
- l'intensité de chaque pixel de cette image numérique est reliée, par une seconde relation prédéfinie, à la valeur $U(\underline{X})$ calculée pour le point du milieu auquel ce pixel est relié par la première relation prédéfinie ;

c) le calcul automatique, des valeurs $U(\underline{X})$ du phénomène physique pour une seconde valeur B du paramètre, distincte de la première valeur A, ce calcul comportant la résolution du système d'équations avec la seconde valeur B du paramètre, pour calculer des valeurs $U(\underline{X})$ pour les mêmes points du milieu que lors de l'étape a), et

d) la construction d'une image numérique d'arrivée du phénomène physique, formée d'une pluralité de pixels, dans laquelle :

- la position de chaque pixel est reliée, par la première relation prédéfinie, aux coordonnées \underline{X} du point du milieu pour lequel une valeur $U(\underline{X})$ a été calculée lors de l'étape c), et
- l'intensité de chaque pixel de cette image numérique est reliée par, la seconde relation prédéfinie, à la valeur $U(\underline{X})$ pour le point du milieu auquel ce pixel est relié par la première relation prédéfinie ;

e) la création d'une image intermédiaire du phénomène physique pour une troisième valeur C du paramètre comprise entre les première A et seconde B valeurs ;

l'étape e) comportant :

- le calcul d'un taux T1 de morphing au moyen de la formule suivante : $T1 = 100 * (C - A) / (B - A)$, ce taux T1 étant exprimé en pourcentage ;
- la construction de l'image intermédiaire, en exécutant un procédé de morphing entre les images de départ et d'arrivée avec le taux T1, les intensités des pixels de cette image intermédiaire étant reliées par la seconde relation prédéfinie aux valeurs $U(\underline{X})$ du phénomène physique au niveau des mêmes points du milieu que ceux pour lesquels des valeurs $U(\underline{X})$ ont été calculées lors des étapes a) et c), sans avoir à résoudre le système d'équations pour la troisième valeur C du paramètre p.

En utilisant le procédé de morphing pour calculer l'image intermédiaire, on évite d'avoir à résoudre le système d'équations du modèle pour chaque valeur intermédiaire du paramètre p

Morphing appliqué aux simulations numériques dans le cadre de la recherche en sismologie et de la protection des habitats et édifices.

tout en obtenant une bonne estimation des valeurs $U(\underline{X})$ pour ces valeurs intermédiaires du paramètre p .

Les inventeurs ont découvert qu'en représentant les valeurs $U(\underline{X})$ du phénomène sous forme d'image numérique pour deux valeurs A et B du paramètre p , et en utilisant le procédé de morphing pour construire l'image intermédiaire pour la valeur C du paramètre à partir de ces deux images numériques, on obtient à partir de cette image intermédiaire des valeurs $U(\underline{X})$ qui sont très proches des valeurs $U(\underline{X})$ qui seraient calculées en résolvant le système d'équations du modèle pour la valeur C .

On détermine ainsi les valeurs $U(\underline{X})$ du phénomène pour la valeur C du paramètre sans avoir besoin de résoudre le système d'équations du modèle. Comme le procédé de morphing est plus simple à mettre en œuvre que la résolution du système d'équations, cette détermination nécessite moins de ressources informatiques et est réalisée en un temps réduit.

Les modes de réalisation de l'invention peuvent présenter une ou plusieurs des caractéristiques suivantes :

- le phénomène physique dépend d'une fréquence, le paramètre p du modèle étant cette fréquence.
- la valeur $U(\underline{X})$ est choisie dans le groupe composé de l'amplitude ou la phase d'une onde, la température du milieu, une contrainte mécanique au sein du milieu.
- le phénomène physique dépend d'un instant t du temps auquel il est mesuré, le paramètre p du modèle étant cet instant t .
- le phénomène physique dépend d'une forme géométrique au sein du milieu, le paramètre p du modèle étant un paramètre géométrique caractéristique de cette forme géométrique.
- lors de l'étape e), la construction de l'image intermédiaire au moyen du procédé de morphing comporte :
 - l'acquisition d'une pluralité de pixels de contrôle à l'intérieur de l'image de départ et d'une pluralité de pixels de contrôle correspondants à l'intérieur de l'image d'arrivée,
 - la détermination automatique, à partir des seuls pixels de contrôle des images de départ et d'arrivée, d'une transformation linéaire qui transforme chaque pixel de contrôle de l'image de départ en un pixel de contrôle correspondant de l'image d'arrivée ;
 - l'application de ladite transformation linéaire, pondérée par le taux $T1$ de morphing, sur chaque pixel de l'image de départ, pour obtenir les pixels respectifs de l'image intermédiaire.
- le procédé comporte en outre :

Morphing appliqué aux simulations numériques dans le cadre de la recherche en sismologie et de la protection des habitats et édifices.

- le calcul automatique des valeurs $U(\underline{X})$ du phénomène physique pour la troisième valeur C du paramètre, ce calcul comportant la résolution du système d'équations avec la troisième valeur C du paramètre, pour calculer des valeurs $U(\underline{X})$ pour les mêmes points du milieu que lors des étapes a) et c), et
- la construction d'une image numérique de contrôle, formée d'une pluralité de pixels, dans laquelle :
 - la position de chaque pixel est reliée par la première relation prédéfinie aux coordonnées \underline{X} du point du milieu pour lequel une valeur $U(\underline{X})$ a été calculée, et
 - l'intensité de chaque pixel de cette image de contrôle est reliée par la seconde relation prédéfinie à la valeur $U(\underline{X})$ pour le point du milieu auquel ce pixel est relié par la première relation prédéfinie ;
- l'estimation d'un taux d'erreur sur les intensités des pixels de l'image intermédiaire, ce taux d'erreur étant estimé à partir de différences entre les intensités des pixels de l'image intermédiaire et de l'image de contrôle reliés au même point du milieu par la première relation.

- le procédé comporte le calcul d'au moins une valeur $U(\underline{X})$ en un point du milieu, pour la valeur C du paramètre p, à partir de l'intensité du pixel relié à ce point du milieu par la première relation prédéfinie et à l'aide de la seconde relation prédéfinie.

Selon un autre aspect, l'invention concerne également un support d'enregistrement d'informations, comportant des instructions pour l'exécution d'un procédé conforme à l'invention lorsque ces instructions sont exécutées par un calculateur électronique.

Selon un autre aspect, l'invention concerne également un calculateur électronique pour la mise en œuvre de l'invention, pour déterminer des valeurs $U(\underline{X})$ d'un phénomène physique dans un milieu, ce phénomène physique étant modélisé par un modèle physique linéaire comportant un paramètre p du modèle, la valeur du paramètre p étant indépendante de la valeur $U(\underline{X})$, de sorte que chaque valeur $U(\underline{X})$ soit la solution d'un système d'équations linéaires qui relie entre elles les coordonnées \underline{X} d'un point du milieu, le paramètre p et la valeur $U(\underline{X})$ du phénomène physique en ce point, ce calculateur étant programmé pour :

a) calculer automatiquement des valeurs $U(\underline{X})$ du phénomène physique pour une première valeur A du paramètre, ce calcul comportant la résolution du système d'équations avec la première valeur A du paramètre, pour calculer des valeurs $U(\underline{X})$ en différents points du milieu,

Morphing appliqué aux simulations numériques dans le cadre de la recherche en sismologie et de la protection des habitats et édifices.

b) construire une image numérique de départ du phénomène physique, formée d'une pluralité de pixels, dans laquelle :

- la position de chaque pixel est reliée par une première relation prédéfinie aux coordonnées \underline{X} d'un point du milieu pour lequel une valeur $U(\underline{X})$ a été calculée lors de l'étape a), et
- l'intensité de chaque pixel de cette image numérique est reliée par une seconde relation prédéfinie à la valeur $U(\underline{X})$ calculée pour le point du milieu auquel ce pixel est relié par la première relation prédéfinie ;

c) calculer automatiquement, des valeurs $U(\underline{X})$ du phénomène physique pour une seconde valeur B du paramètre, distincte de la première valeur A, ce calcul comportant la résolution du système d'équations avec la seconde valeur B du paramètre, pour calculer des valeurs $U(\underline{X})$ pour les mêmes points du milieu que lors de l'étape a), et

d) construire une image numérique d'arrivée du phénomène physique, formée d'une pluralité de pixels, dans laquelle :

- la position de chaque pixel est reliée par la première relation prédéfinie aux coordonnées \underline{X} du point du milieu pour lequel une valeur $U(\underline{X})$ a été calculée lors de l'étape c), et
- l'intensité de chaque pixel de cette image numérique est reliée par la seconde relation prédéfinie à la valeur $U(\underline{X})$ pour le point du milieu auquel ce pixel est relié par la première relation prédéfinie ;

e) créer une image intermédiaire du phénomène physique pour une troisième valeur C du paramètre comprise entre les première A et seconde B valeurs ;

le calculateur étant programmé pour que l'étape e) comporte :

- le calcul d'un taux T1 de morphing au moyen de la formule suivante : $T1 = 100 * (C - A) / (B - A)$, ce taux T1 étant exprimé en pourcentage ;
- la construction de l'image intermédiaire, en exécutant un procédé de morphing entre les images de départ et d'arrivée avec le taux T1, les intensités des pixels de cette image intermédiaire étant reliées par la seconde relation prédéfinie aux valeurs $U(\underline{X})$ du phénomène physique au niveau des mêmes points du milieu que ceux pour lesquels des valeurs $U(\underline{X})$ ont été calculées lors des étapes a) et c), sans avoir à résoudre le système d'équations pour la troisième valeur C du paramètre p.

L'invention sera mieux comprise à la lecture de la description qui va suivre, donnée uniquement à titre d'exemple non limitatif et faite en se référant aux dessins sur lesquels :

Morphing appliqué aux simulations numériques dans le cadre de la recherche en sismologie et de la protection des habitats et édifices.

- la figure 1 est une illustration schématique d'un système physique dans lequel se produit un phénomène physique ;
 - la figure 2 est une illustration schématique d'une image numérique représentative de valeurs du phénomène physique du système de la figure 1 ;
 - la figure 3 est une illustration schématique d'un exemple d'un dispositif pour déterminer les valeurs du phénomène physique de la figure 1 ;
 - la figure 4 est un ordinogramme d'un procédé pour déterminer les valeurs du phénomène physique de la figure 1 ;
 - les figures 5 à 8 sont des exemples d'images numériques représentant les valeurs du phénomène physique de la figure 1 pour différentes valeurs d'un paramètre p ;
 - la figure 9 est une illustration schématique d'un autre mode de réalisation d'un système physique apte à remplacer celui de la figure 1 ;
 - les figures 10A à 10E sont des exemples d'images numériques représentant les valeurs du phénomène physique de la figure 9 pour différentes valeurs d'un paramètre p ;
 - les figures 11A à 11D sont des exemples d'images numériques représentant un autre phénomène physique dans le système de la figure 9 pour différentes valeurs d'un paramètre p .
- Dans ces figures, les mêmes références sont utilisées pour désigner les mêmes éléments.

Dans la suite de cette description, les caractéristiques et fonctions bien connues de l'homme du métier ne sont pas décrites en détails.

La figure 1 représente un système physique. Au sein de ce système se déroule un phénomène physique dans une région de l'espace. Ce phénomène physique peut présenter des valeurs différentes en différents points de l'espace. On note $U(\underline{X})$ la valeur de ce phénomène en un point de l'espace qui a pour coordonnées \underline{X} , où \underline{X} est un vecteur défini par rapport à un repère R prédéfini de l'espace. Le repère R est ici un repère orthogonal qui comporte deux axes d'abscisse x et d'ordonnée y .

Ce phénomène physique est modélisé par un modèle physique linéaire qui prend comme valeur d'entrée les coordonnées \underline{X} du point et un paramètre p du modèle. La valeur du paramètre p est indépendante des coordonnées \underline{X} . On note $M(\underline{X}, p)$, ou tout simplement M , ce modèle. Chaque valeur $U(\underline{X})$ est la solution d'un système d'équations linéaires qui relie entre elles :

- les coordonnées \underline{X} ,
- la valeur $U(\underline{X})$ du phénomène physique en ce point, et
- le paramètre p .

Morphing appliqué aux simulations numériques dans le cadre de la recherche en sismologie et de la protection des habitats et édifices.

Par linéaire, on entend que la relation suivante est satisfaite pour des coordonnées quelconques \underline{X}_1 , \underline{X}_2 et pour des valeurs réelles α et β quelconques : $U(\alpha*\underline{X}_1+\beta*\underline{X}_2) = \alpha*U(\underline{X}_1) + \beta*U(\underline{X}_2)$. Un grand nombre de types différents d'équations peuvent être utilisées pour construire le modèle M. Par exemple, ces équations peuvent être des équations aux dérivées partielles et/ou des équations différentielles stochastiques. Les coefficients constants de ces équations peuvent être de simples valeurs réelles, des matrices ou autres.

Dans cet exemple, le phénomène physique est une onde mécanique élastodynamique qui se propage au sein d'un milieu dans un plan de l'espace à deux dimensions. La valeur $U(\underline{X})$ correspond ici à l'amplitude d'un champ de déplacement au point de coordonnées \underline{X} . Le paramètre p est ici une grandeur scalaire qui correspond à la fréquence d'émission de ces ondes. Cette onde est ici diffractée par un solide qui est placé à l'intérieur de ce milieu. Ici, ce solide est une lentille de Luneburg. Le milieu est ici un fluide.

De façon connue, en optique, une lentille de Luneburg est une lentille à gradient d'indice de réfraction non nul et qui présente une symétrie cylindrique (ou circulaire). Dans cet exemple, dans le cas d'ondes mécaniques, on définit une « lentille de Luneburg » par analogie avec la lentille de Luneburg connue dans le domaine de l'optique, à la différence près que cette lentille permet de diffracter des ondes mécaniques élastodynamiques et non pas un rayonnement lumineux. En particulier, l'indice de réfraction optique y est remplacé par un rapport entre la densité ρ et les coefficients de Lamé λ et μ du matériau formant la lentille 10. Cependant, pour simplifier, on considère dans cet exemple que les coefficients de Lamé sont constants au sein du matériau formant la lentille 10 et donc que seule la densité ρ varie. Ainsi, dans cet exemple, la « lentille de Luneburg » est un solide qui présente un gradient de densité non nul et qui présente une symétrie cylindrique ou circulaire.

Ainsi, le système physique comporte :

- une lentille de Luneburg 10, s'étendant dans un milieu 12 de l'espace à deux dimensions ;
- une source 14 apte à émettre des ondes élastodynamiques dans le milieu 12.

Dans cet exemple, le milieu 12 est une surface de forme carrée avec un côté de 50 cm. L'origine du repère R est placée dans un coin inférieur gauche du milieu 12. La densité de ce milieu 12 est égale à 1×10^3 kg/m³.

La lentille 10 présente une forme circulaire avec un rayon $D/2$ et de centre O. Ici, le rayon $D/2$ est égal à 5 cm. Le centre O est ici placé au centre géométrique du milieu 12.

Dans cette description, le centre géométrique d'un objet est défini comme le barycentre de tous les points formant cet objet, chacun pondéré par un coefficient égal à un.

Morphing appliqué aux simulations numériques dans le cadre de la recherche en sismologie et de la protection des habitats et édifices.

La densité ρ de cette lentille 10 varie ici de façon discontinue depuis le centre O jusqu'au bord extérieur de la lentille 10. La lentille 10 est ainsi partagée en une zone circulaire centrale de centre O et dix zones annulaires concentriques, chacune délimitée par deux cercles concentriques autour du centre O. Ces zones sont adjacentes deux à deux et ne se recouvrent pas mutuellement. Ainsi, un même cercle sert à délimiter deux zones. Le rayon maximal de la n-ième zone est égal à $(n/11)*(D/2)$ où n est un entier naturel non nul. La densité ρ de la zone centrale est égale à 2,1. On note Z_1 cette zone sur la figure 1. Les autres zones circulaires présentent une densité ρ qui diminue de proche en proche d'une quantité égale à 0,1 à chaque fois que l'on passe d'une zone à l'autre en s'éloignant du centre O en direction de l'extérieur de la lentille 10 le long du rayon de la lentille 10. Ainsi, la zone annulaire qui est située le plus loin du centre O présente une densité ρ égale à 1,1. Sur la figure 1, cette zone porte la référence Z_{11} .

Par exemple, la lentille 10 est réalisée, à partir de matériaux différents présentant des densités différentes, tels que des matières plastiques ou minérales.

La source 14 émet des ondes de pression (aussi dites « ondes P ») dans toutes les directions de l'espace à deux dimensions. La source 14 est ici positionnée en entrée de la lentille 10, et présente les coordonnées suivantes définies par rapport au repère R : $X_s = L/2 - D/2 - 0,5\text{cm}$ et $Y_s = L/2$, où X_s est l'abscisse et Y_s est l'ordonnée du centre de la source 14, et L est la longueur du côté du milieu 12. Par exemple, la source 14 est un transducteur piézoélectrique alimenté par une source d'énergie.

Dans cet exemple à deux dimensions, les coordonnées \underline{X} d'un point du milieu 12 sont donc exprimées par un vecteur à deux dimensions qui comporte une abscisse X et une ordonnée Y. Ces coordonnées sont ici des coordonnées cartésiennes exprimées dans le repère R.

Ainsi, dans cet exemple, le modèle M qui modélise la propagation et la diffraction des ondes émises par la source 14 est basé sur l'équation de Navier, qui peut s'écrire de la façon suivante :

$$\nabla(C \cdot \nabla U) = \rho \frac{\partial^2 U}{\partial t^2}$$

ou, en notation indicielle, de la façon suivante :

$$\rho(X) \frac{\partial^2 U_i}{\partial t^2} = \sum_{j=1}^d \frac{\partial}{\partial X_j} \sum_{k=1}^d \sum_{l=1}^d C_{ijkl} \frac{\partial U_k}{\partial X_l}$$

où :

- $\rho(\underline{X})$ est la densité du milieu au point de coordonnées \underline{X} ,
- C le tenseur d'élasticité dont les composantes C_{ijkl} sont fonction des coefficients de Lamé,
- t est la variable temps,
- d est la dimension de l'espace et
- U est l'amplitude du champ de déplacement.

Ici, la dimension d est égale à deux. Le tenseur C a ici seize composantes.

Le paramètre p est alors la fréquence d'émission de ces ondes par la source 14.

La figure 2 représente une image numérique 20 du phénomène physique pour une valeur du paramètre p .

De façon connue, une image numérique est formée d'une pluralité de pixels. L'image 20 comporte ici une pluralité de pixels 22 de tailles identiques les uns aux autres. Pour une image à deux dimensions, ces pixels sont typiquement arrangés pour former une matrice de forme carrée ou rectangulaire. Ici, l'image présente une forme carrée avec une résolution de 50 par 50 pixels par cm^2 . Cependant, pour des raisons de clarté, seuls un nombre réduit de pixels 22 sont représentés sur la figure 2.

Chaque pixel comporte une position dans l'image et une valeur d'intensité de pixel. La valeur d'intensité est comprise entre une valeur minimale et une valeur maximale prédéfinie. Par exemple, l'image 20 est enregistrée sous la forme d'une matrice \underline{I} dont chaque coefficient correspond à la valeur d'intensité d'un pixel.

Dans cet exemple, l'image numérique est en niveaux de gris encodés sur 8 bits. La valeur d'intensité de pixel est comprise à l'intérieur de l'intervalle $[0 ; 255]$.

La position de chaque pixel de l'image est associée aux coordonnées \underline{X} d'un point du milieu 12 par une relation $R1$ prédéfinie.

Par exemple, le milieu 12 est partagé en une pluralité d'éléments géométriques de surface de taille et de forme identiques et en nombre égal au nombre des pixels de l'image 20. La relation $R1$ est alors définie de manière à associer de façon biunivoque un pixel de l'image 20 à chacun des éléments géométriques du milieu 12, et cela pour tous les pixels de l'image 20.

De même, la valeur d'intensité de chaque pixel est reliée, par une relation $R2$ prédéfinie, à la valeur $U(\underline{X})$ du phénomène au point de coordonnées \underline{X} qui est associé à ce pixel par la relation $R1$.

Par exemple, la valeur $U(\underline{X})$ est comprise entre des valeurs minimale U_{\min} et maximale U_{\max} au sein du milieu 12. La relation $R2$ est alors une relation qui relie l'intervalle $[0 ; 255]$ des intensités de pixels de l'image 20 à l'intervalle $[U_{\min} ; U_{\max}]$. Dans cet exemple, avec les

Morphing appliqué aux simulations numériques dans le cadre de la recherche en sismologie et de la protection des habitats et édifices.

valeurs de fréquence et de taille de l'espace 12 choisies, le déplacement $U(\underline{X})$ est de l'ordre du millimètre. Ainsi, on a par exemple $U_{\min} = 0\text{mm}$ et $U_{\max} = 10\text{mm}$.

Ainsi, grâce aux relations R1 et R2, les valeurs $U(\underline{X})$ du phénomène physique dans le milieu 12 peuvent être représentées sous la forme d'une image numérique pour une valeur donnée du paramètre p.

La figure 3 représente un dispositif 30 de calcul des valeurs $U(\underline{X})$. Ce dispositif 30 comporte :

- un calculateur électronique 32 programmable ;
- un support d'enregistrement 34 d'informations ;
- une interface 36 d'échange de données.

Le support 34 comporte des instructions nécessaires pour exécuter le procédé de détermination des valeurs $U(\underline{X})$ de la figure 4. Le calculateur 32 lit et exécute les instructions enregistrées sur le support 34. Le calculateur 32 est notamment apte à résoudre les équations du modèle M pour différentes valeurs du paramètre p et pour construire des images numériques à partir des valeurs calculées. L'interface 36 permet l'échange et le transfert de données par exemple pour l'affichage des images numériques construites par le calculateur 32. Par exemple, le dispositif 30 est un micro-ordinateur connu en soi et équipé d'un logiciel de simulation numérique pour résoudre numériquement les équations du modèle M. Ici, on utilise le logiciel de calcul aux différences finies dans le domaine temporel (acronyme FDTD pour « finite difference time domain » en anglais) sous licence académique SIMSONIC pour modéliser la propagation et la diffraction des ondes élastodynamiques émises par la source 14 dans le milieu 12.

Un exemple de mise en œuvre du procédé de détermination des valeurs $U(\underline{X})$ va maintenant être décrit en référence à l'ordinogramme de la figure 4 et à l'aide des figures 1 à 3.

D'abord, lors d'une étape 40, le modèle M est acquis par le calculateur 32. Le calculateur 32 acquiert également des valeurs du paramètre p pour lesquelles le calcul des valeurs $U(\underline{X})$ doit être réalisé.

Dans cet exemple, ce calcul est réalisé pour trois valeurs A, B, et C du paramètre p, telles que $A < C < B$. Ici, la valeur A est égale à 150 kHz, la valeur B est égale à 250 kHz et la valeur C est égale à 200 kHz.

Lors d'une étape 42, le calculateur 32 calcule automatiquement les valeurs $U(\underline{X})$ pour chacun des points de coordonnées \underline{X} du milieu 12. On note ces valeurs $U_A(\underline{X})$. Ce calcul est effectué en résolvant automatiquement les équations du modèle M pour lequel le paramètre p prend la valeur A.

Morphing appliqué aux simulations numériques dans le cadre de la recherche en sismologie et de la protection des habitats et édifices.

Ensuite, lors d'une étape 44, le calculateur 32 construit automatiquement une image numérique 46 (Figure 5). L'image 46 est identique à l'image 20 sauf qu'elle est calculée pour la valeur du paramètre p égale à A .

Par exemple, l'image 46 est créée en définissant une pluralité de pixels. Puis, pour chaque pixel, le calculateur 32 associe automatiquement, au moyen de la relation $R1$, la coordonnée \underline{X} du point correspondant du milieu 12. Le calculateur 32 affecte ensuite à ce pixel une valeur d'intensité qui correspond, par l'intermédiaire de la relation $R2$, à la valeur $U_A(\underline{X})$ calculée pour le point correspondant.

Dans ce qui suit, l'image 46 sera nommée « image de départ ». La figure 5 représente cette image 46. Sur cette image 46, les pixels de couleur noire représentent une valeur $U_A(\underline{X})$ nulle. Les pixels de couleur claire représentent une valeur $U_A(\underline{X})$ élevée d'amplitude du champ électromagnétique.

Sur la figure 5, le contour extérieur de la lentille 10 ainsi que les interfaces entre les zones consécutives de la lentille 10 sont représentées schématiquement par des traits pleins de couleur blanche. Ces traits ne font cependant pas partie de l'image 46 et ne sont représentés sur la figure 5 que pour en faciliter la compréhension. Il en va de même pour la source 14. Sur cette figure 5, une graduation de l'axe des abscisses correspond à une distance de 10cm. Il en va de même pour l'axe des ordonnées.

La propagation des ondes émises et leur diffraction crée un déplacement de la matière au sein du milieu 12 et de la lentille 10. Cela se traduit sur l'image 46 par les valeurs non nulles du champ de déplacement dans le milieu 12, matérialisées par des pixels d'intensité non nulle (de teinte claire).

On observe les ondes de pression émises par la source 14 dans toutes les directions de l'espace à deux dimensions. On s'intéresse plus spécifiquement aux ondes de pression qui se propagent selon l'axe y . Lorsque ces ondes arrivent à l'interface avec la lentille 10, elles sont diffractées par la lentille 10 et donnent naissance à des ondes de cisaillement (aussi nommées « ondes S ») au sein de la lentille 10. Ainsi, à l'intérieur de la lentille 10, se propagent des ondes de pression et de cisaillement couplées entre elles. Le déplacement $U(\underline{X})$ à l'intérieur de la lentille 10 est donc la résultante de l'action de ces deux ondes. Par exemple, le déplacement $U(\underline{X})$ se décompose en une composante de cisaillement $U_x(\underline{X})$ et une composante de pression $U_y(\underline{X})$ telles que $U(\underline{X}) = [U_x^2(\underline{X}) + U_y^2(\underline{X})]^{1/2}$. De façon connue, les ondes de cisaillement se propagent à l'intérieur de la lentille 10 avec une vitesse qui est plus faible que celle des ondes de pression. Ces ondes se propagent à l'intérieur de la lentille 10 en passant successivement dans les zones de la lentille 10 qui présentent les différentes valeurs de densité. Les ondes de

Morphing appliqué aux simulations numériques dans le cadre de la recherche en sismologie et de la protection des habitats et édifices.

cisaillement qui, après avoir traversé la lentille 10, arrivent à l'interface entre la lentille 10 et le milieu 12, sont converties en ondes de pression. Il est connu que les ondes de cisaillement ne peuvent pas se propager à l'intérieur d'un fluide.

Lors d'une étape 48 (figure 4), le calculateur 32 calcule automatiquement des valeurs $U(\underline{X})$ du phénomène pour les mêmes points de coordonnées X du milieu 12 que pour ceux de l'étape 42. Ce calcul est ici réalisé pour la valeur B du paramètre p . On note $U_B(\underline{X})$ les valeurs du phénomène ainsi calculées. L'étape 48 est par exemple identique à l'étape 40, sauf que la valeur du paramètre p est égale à B .

Ensuite, lors d'une étape 50, le calculateur 32 construit automatiquement une image numérique 52 (Figure 6) à partir des valeurs $U_B(\underline{X})$ calculées. Par exemple, cette étape 50 est identique à l'étape 44, sauf que l'intensité des pixels est associée aux valeurs $U_B(\underline{X})$ calculées. On observe sur l'image 52 la différence de fréquence d'émission des ondes par rapport à l'image 46.

Dans ce qui suit, l'image 52 sera nommée « image d'arrivée ». La figure 6 représente cette image 52. L'image 52 est par exemple identique à l'image 20, sauf pour la valeur d'intensité des pixels. Tout ce qui a été dit en référence à l'image 46 s'applique à l'image 52.

Ensuite, lors d'une étape 54 (figure 4), le calculateur 32 détermine automatiquement les valeurs $U(\underline{X})$ pour la valeur du paramètre p égal à C . Cette détermination est ici réalisée sans résoudre les équations du modèle M avec la valeur C du paramètre p , comme on va le voir ci-après.

D'abord, lors d'une opération 56, le calculateur 32 détermine automatiquement un taux de morphing, noté $T1$, à partir de la valeur C du paramètre p et au moyen de la formule suivante : $T1 = 100*(C-A)/(B-A)$. Ce taux $T1$ est exprimé en pourcentage. Avec les valeurs de A , B et C choisies, le taux $T1$ est ici égal à 50 %.

Puis, lors d'une opération 58, le calculateur 32 construit automatiquement une image 60 (Figure 7) par application d'un procédé de morphing entre les images 46 et 52 et avec le taux $T1$.

La figure 7 représente cette image 60. Cette image 60 est par exemple de dimensions identiques aux images 46 et 52. L'image 60 est par la suite nommée « image intermédiaire ».

Le « morphing » (aussi connu sous le terme de « morphose ») est une technique connue qui permet notamment d'interpoler une image intermédiaire entre deux images connues. Un procédé de morphing est par exemple décrit dans l'article de D. Terzopoulos et al, « Elastically deformable models », Computer graphics, 21, p. 205-214, SIGGRAPH '87, 1987.

Par exemple, l'opération 58 comporte :

Morphing appliqué aux simulations numériques dans le cadre de la recherche en sismologie et de la protection des habitats et édifices.

- l'acquisition d'une pluralité de pixels, dits « pixels de contrôle », à l'intérieur de l'image 46 ;
- l'acquisition d'une pluralité de pixels de contrôle correspondants à l'intérieur de l'image 52 ;
- la détermination automatique d'une transformation linéaire T qui, lorsqu'elle est appliquée, transforme chaque pixel de contrôle de l'image 46 en un pixel de contrôle correspondant de l'image 50 ;
- puis, l'application de cette transformation T , pondérée par le taux $T1$, sur chaque pixel de l'image 46 pour obtenir les pixels de l'image 60.

Le choix du nombre et de la position des pixels de contrôle résulte d'un compromis entre des exigences de rapidité de calcul et de fiabilité du résultat. Par exemple, ces pixels sont identifiés et choisis par un utilisateur du procédé, qui spécifie leur position au moyen de l'interface 36.

L'homme du métier sait que, dans un procédé de morphing, les pixels de contrôle correspondants entre les images 46 et 52 doivent préférentiellement être placés sur des mêmes emplacements de l'objet sous-jacent représenté par ces images pour que le morphing ne modifie pas excessivement les proportions entre les images 46 et 52.

Par exemple, les pixels de contrôle choisis pour une image donnée correspondent à des caractéristiques du phénomène physique qui sont visuellement identifiables sur cette image et dont la position au sein du milieu 12 change lorsque le paramètre p varie.

Plus précisément, les pixels de contrôle de l'image 46 sont des pixels de cette image dont la valeur d'intensité est associée à une valeur $U(\underline{X})$ représentative d'une caractéristique spécifique du phénomène physique qui est visuellement identifiable. Les pixels de contrôle de l'image 52 sont des pixels de cette image dont la valeur d'intensité est associée à une valeur $U(\underline{X})$ représentative de cette même caractéristique spécifique sur l'image 52. Ici, comme le phénomène physique est la propagation d'une onde dans le milieu 12, les pixels de contrôle des images 46 et 52 sont préférentiellement choisis parmi les pixels respectifs qui correspondent, sur cette image, à un front d'onde dont la position dans le milieu 12 varie entre les images 46 et 52. Ici, il y a donc une correspondance bijective entre les pixels de contrôle des images 46 et 52.

De préférence, les pixels de contrôle ne sont pas placés trop près les uns des autres. Par exemple, la distance entre deux pixels les plus proches est supérieure ou égale à $0,001*LC$ ou à $0,005*LC$, LC étant la longueur du côté de l'image.

De préférence, les pixels de contrôle ne sont pas tous alignés les uns avec les autres. Par exemple, au moins 5 % ou 20 % ou 50 % des pixels de contrôle ne sont pas situés sur une

Morphing appliqué aux simulations numériques dans le cadre de la recherche en sismologie et de la protection des habitats et édifices.

droite du plan de l'image le long de laquelle sont alignés au moins deux autres pixels de contrôle.

Un exemple de critère pour le choix des pixels de contrôle est décrit dans l'article de S-Y. Lee et al., « Image morphing using deformation techniques », *Journal of Visualisation and Computer Animation*, 7(1), p. 3-23, 1996.

Par exemple, les positions dans l'image des pixels de contrôle sont stockées en mémoire par le dispositif 30 dans des vecteurs, respectivement notés \underline{C}_1 et \underline{C}_2 pour les images 46 et 52. Ces vecteurs \underline{C}_1 et \underline{C}_2 présentent ici les mêmes dimensions.

Par exemple, pour déterminer la transformation T , le calculateur 32 définit sur l'image 46 un maillage à partir des points de contrôle de cette image 46. Les pixels de contrôle définissent les sommets de ce maillage. Un maillage analogue est défini sur l'image 52 à partir des pixels de contrôle de cette image. Des procédés connus permettent alors de déterminer automatiquement la transformation T qui transforme le maillage de l'image 46 en un maillage identique à celui de l'image 52. Typiquement, la transformation T se présente sous la forme d'une matrice.

Cette transformation T est avantageusement bijective.

L'application de la transformation T pour construire l'image 60 est par exemple représenté par l'équation suivante : $\underline{I}_C = T \underline{I}_A$, où :

- T est la matrice définissant la transformation T ;
- \underline{I}_A et \underline{I}_C sont des matrices correspondant aux images, respectivement, 46 et 52.

Dans cet exemple, l'opération 56 est réalisée au moyen du logiciel de morphing « Sqirlz Morph » disponible à l'adresse internet suivante : « www.xiberpix.net/SqirlzMorph.html ».

A l'issue de l'étape 54, on dispose de l'image 60 dont les pixels ont chacun pour valeurs d'intensité une valeur représentative des valeurs du phénomène physique dans le cas où le paramètre p est égal à C .

Enfin, éventuellement, lors d'une étape 62, les valeurs $U(\underline{X})$ pour la valeur C du paramètre p , notées $U_C(\underline{X})$, sont calculées automatiquement par le calculateur 32 à partir des valeurs des pixels de l'image 60 et à l'aide de la relation R2. On dispose ainsi d'une estimation fiable des valeurs $U_C(\underline{X})$ sans avoir besoin de résoudre le modèle M pour la valeur C du paramètre p .

En utilisant le procédé de morphing pour calculer l'image 60, on évite d'avoir à résoudre le système d'équations du modèle M pour chacune des valeurs du paramètre p pour lesquelles on souhaite déterminer les valeurs $U(\underline{X})$.

Ainsi, pour déterminer les valeurs $U(\underline{X})$ pour une ou pour plusieurs valeurs du paramètre p , il suffit de calculer les valeurs $U(\underline{X})$ pour les valeurs A et B du paramètre p à l'aide du modèle.

Morphing appliqué aux simulations numériques dans le cadre de la recherche en sismologie et de la protection des habitats et édifices.

Les valeurs $U(\underline{X})$ pour les autres valeurs du paramètre p , dites valeurs intermédiaires, peuvent être facilement obtenues par morphing entre les images de départ et d'arrivée. La résolution de systèmes d'équations du modèle M n'a donc besoin d'être mise en œuvre que deux fois, quel que soit le nombre de valeurs intermédiaires du paramètre p .

Comme le procédé de morphing est plus simple et plus rapide à mettre en œuvre que la résolution du système d'équations du modèle M , cette détermination des valeurs $U(\underline{X})$ nécessite moins de ressources informatiques et peut être réalisée en un temps plus court.

En outre, les inventeurs ont découvert que cette façon de déterminer par morphing les valeurs $U(\underline{X})$ pour les valeurs intermédiaires du paramètre p n'engendrait pas d'erreur notable sur la précision du résultat.

Par exemple, lors d'une étape 64, on estime l'erreur entre les valeurs $U_C(\underline{X})$ obtenues par l'étape 62, et celles calculées à partir du modèle M . Cette étape 64 comporte ici :

- le calcul automatique, par le calculateur 32, de valeurs $U_{C2}(\underline{X})$ en résolvant les équations du modèle M pour la valeur C du paramètre p et pour les mêmes points du milieu 12 que pour les images 46 et 52 ;
- la construction automatique d'une image numérique 66 (Figure 8) dite de contrôle ;
- l'estimation automatique d'un taux d'erreur entre les intensités de pixels des images 60 et 66 correspondant à un même point du milieu 12.

L'étape 64 n'est pas réalisée pour chaque valeur intermédiaire du paramètre p mais seulement pour quelques-unes de ces valeurs intermédiaires. Par exemple, pour un nombre NS de valeurs intermédiaires du paramètre p utilisées lors de l'étape 54, l'étape 64 est exécutée uniquement pour k/NS de ces valeurs intermédiaires du paramètre p , où k est un entier strictement inférieur à NS et, typiquement, au moins deux ou dix fois inférieur à NS .

La position de chaque pixel de l'image 66 est reliée par la relation $R1$ aux coordonnées \underline{X} du point du milieu 12. L'intensité de chaque pixel de cette image 66 est reliée par la relation $R2$ à la valeur $U_{C2}(\underline{X})$ en ce point de coordonnées \underline{X} .

Par exemple, le taux d'erreur est estimé en calculant, pour chaque pixel de l'image 60, la différence entre l'intensité de ce pixel et l'intensité du pixel de l'image 66 qui est associé, par la relation $R1$, au même point de coordonnées \underline{X} que ce pixel.

Plus précisément, ici, le taux d'erreur est calculé à partir d'une norme de l'espace L^2 . Par exemple, on construit une image numérique dite « image d'erreur » entre les images 60 et 66. Chaque pixel de l'image d'erreur a pour valeur d'intensité la différence entre les intensités de pixels des deux images 60 et 66. On applique ensuite sur cette image d'erreur une fonction F de norme de l'espace L^2 , par exemple donnée par la formule suivante :

$$F = \left(\frac{1}{N} \sum_{i=1}^N \left(\frac{K_i}{255} \right)^2 \right)^{\frac{1}{2}}$$

où i est un indice entier qui identifie de façon unique un pixel de cette image, N est le nombre de pixels de l'image d'erreur et K_i un nombre entier dont la valeur est égale à l'intensité du pixel de cette image identifié par l'indice i . Cette fonction F donne une valeur à partir de laquelle on peut calculer un taux d'erreur entre les deux images.

La figure 8 représente cette image 66. On constate ici que l'image 66 est visuellement très similaire de l'image 60. La fonction F présente une valeur égale à 0,0248. On en déduit un taux d'erreur inférieur à 1%, ce qui est faible.

Ainsi, les valeurs $U_C(\underline{X})$ calculées au moyen du morphing lors des étapes 54 puis 62 sont très proches de celles calculées au moyen du modèle M .

Un autre exemple d'application va maintenant être décrit.

La figure 9 représente un système physique apte à remplacer le système de la figure 1. Ce système physique est ici identique au système de la figure 1, sauf que la lentille 10 est remplacée par une lentille mince 100.

Cette lentille 100 est biconvexe et symétrique par rapport à un plan de symétrie transversal et par rapport à un axe de symétrie coupant perpendiculairement ce plan de symétrie en un centre O' de la lentille 100. On note H l'épaisseur de cette lentille, définie comme étant la plus petite distance, mesurée le long de l'axe de symétrie, entre le centre O' et le bord extérieur de la lentille. La lentille 100 est réalisée en matière métallique, telle que de l'aluminium.

Dans cet exemple, on cherche à modéliser la propagation d'une onde mécanique élastodynamique diffractée par la lentille 100, en fonction du temps. Le phénomène physique est donc une onde élastodynamique qui se propage au sein d'un milieu de l'espace à deux dimensions. Comme précédemment, la valeur $U(\underline{X})$ correspond ici à l'amplitude d'un champ de déplacement au point de coordonnées \underline{X} dans le repère R . Le paramètre p correspond ici à un instant t du temps.

Ainsi, le système physique comporte :

- la lentille 100, placée dans un milieu 102 de l'espace ;
- une source 104, apte à émettre des ondes élastodynamique dans le milieu 102.

Le milieu 102 est par exemple identique au milieu 12. Le centre O' de la lentille 100 est ici placé au centre du milieu 102.

Morphing appliqué aux simulations numériques dans le cadre de la recherche en sismologie et de la protection des habitats et édifices.

La source 104 est ici identique à la source 14. La fréquence d'émission des ondes est constante et choisie égale à 250kHz. La source 14 est ici positionnée en entrée de la lentille 100, et présente les coordonnées suivantes définies par rapport au repère R : $X_s = L/2$ et $Y_s = 3*L/4$, où X_s est l'abscisse et Y_s est l'ordonnée du centre de la source 104, et L est la longueur du côté du milieu 102. L'épaisseur H est égale à 5cm.

Mis à part ces différences, tout ce qui a été décrit en référence au système et au phénomène physique de la figure 1 s'applique ici. Ainsi, dans cet exemple, le modèle M est le même que celui qui a été décrit en référence à la figure 1.

On choisit ici les valeurs suivantes pour le paramètre p : $A = 190\mu s$, $B = 200\mu s$ et $C = 195\mu s$. Les instants du temps sont exprimés à partir d'un instant initial $t = 0\mu s$, à partir duquel la source 104 commence à émettre l'onde. Le taux T1 est donc ici égal à 50 %.

Les étapes du procédé de la figure 4 sont appliquées automatiquement par le calculateur 32 pour calculer les valeurs $U(\underline{X})$ correspondant à la propagation de cette onde. Ainsi, le calculateur 32 applique des étapes identiques aux étapes 40 à 54 pour :

- calculer les valeurs $U_A(\underline{X})$ et construire une image numérique 110 pour la valeur $190\mu s$ du paramètre p ;
- calculer les valeurs $U_B(\underline{X})$ et construire une image numérique 112 pour la valeur $200\mu s$ du paramètre p ;
- construire une image 114 pour la valeur $195\mu s$ du paramètre p, par morphing entre les images 110 et 112, puis calculer les valeurs $U_C(\underline{X})$ à partir des intensités de pixel de l'image 114.

Les figures 10A, 10B et 10C représentent respectivement les images numériques 110, 112, 114. Mis à part le fait qu'elles ne représentent pas le même phénomène physique et donc ne présentent pas nécessairement les valeurs d'intensité de pixels, ce qui a été décrit en référence aux images 46, 52 et 60 s'applique ici aux images, respectivement 110, 112 et 114. De même que précédemment, sur ces figures, le trait de couleur blanche représente le contour extérieur de la lentille 100. Il ne fait cependant pas partie de ces images.

Dans cet exemple, la source 104 émet des ondes de pression dans toutes les directions de l'espace à deux dimensions. Ici, on s'intéresse particulièrement aux ondes émises par la source 104 selon l'axe x et qui se dirigent vers la lentille 100. On observe qu'à l'interface avec la lentille 100, une partie des ondes de pression émises est réfléchiée par la surface de la lentille. Une autre partie de ces ondes se propage à l'intérieur de la lentille 100 et donne naissance à des ondes de cisaillement avec lesquelles elles sont couplées.

Morphing appliqué aux simulations numériques dans le cadre de la recherche en sismologie et de la protection des habitats et édifices.

La figure 10D représente une image numérique 116 de contrôle calculée lors d'une étape identique à l'étape 64, pour estimer l'erreur entre les valeurs $U_C(\underline{X})$ calculées à partir de l'image 114 et des valeurs $U_{C2}(\underline{X})$ calculées à l'aide du modèle M.

La figure 10E représente une image numérique 118 d'erreur dont chaque pixel a pour valeur d'intensité la différence entre les intensités de pixels des deux images 116 et 114. On constate ainsi que les images 114 et 116 sont très similaires l'une avec l'autre. La valeur de la fonction F est ici égale à 0,048, ce qui correspond à un taux d'erreur inférieur à 1 %.

Un autre exemple d'application va maintenant être décrit.

Dans cet exemple, on cherche à modéliser la diffraction d'une onde électromagnétique par la lentille 100, en fonction d'un paramètre géométrique caractéristique de cette lentille 100. Ce système physique est ici identique au système de la figure 9. Le paramètre p du modèle M est la valeur de l'épaisseur H de la lentille. On choisit ici les valeurs suivantes pour le paramètre p : A = 2,5cm, B = 5cm et C = 7,5cm. Le taux T1 est donc ici égal à 50 %.

Les étapes du procédé de la figure 4 sont appliquées automatiquement par le calculateur 32 pour calculer les valeurs $U(\underline{X})$ correspondant à la propagation de cette onde dans ce milieu.

Ainsi, le calculateur 32 applique des étapes identiques aux étapes 40 à 54 pour :

- calculer les valeurs $U_A(\underline{X})$ et construire une image numérique 130 pour la valeur A du paramètre p ;
- calculer les valeurs $U_B(\underline{X})$ et construire une image numérique 132 pour la valeur B du paramètre p ;
- construire une image 134 pour la valeur C du paramètre p, par morphing entre les images 130 et 132, puis calculer les valeurs $U_C(\underline{X})$ à partir des intensités de pixel de l'image 134.

Les figures 11A, 11B et 11C représentent respectivement les images numériques 130, 132, 134. Mis à part le fait qu'elles ne représentent pas le même phénomène physique et donc ne présentent pas nécessairement les mêmes valeurs d'intensité de pixels, ce qui a été décrit en référence aux images 46, 52 et 60 s'applique ici aux images, respectivement 130, 132 et 134.

La figure 11D représente une image numérique 136 de contrôle calculée lors d'une étape identique à l'étape 64, pour estimer l'erreur entre les valeurs $U_C(\underline{X})$ déterminées à partir de l'image 134 et des valeurs $U_{C2}(\underline{X})$ calculées à l'aide du modèle M.

On constate ainsi que les images 134 et 136 sont très similaires l'une avec l'autre.

De nombreux autres modes de réalisation sont possibles. En particulier, cette méthode de détermination peut être utilisée à d'autres systèmes physiques pour calculer les valeurs $U(\underline{X})$ de nombreux autres phénomènes physiques.

Morphing appliqué aux simulations numériques dans le cadre de la recherche en sismologie et de la protection des habitats et édifices.

La lentille 10 peut être remplacée par un milieu qui contient une barrière d'invisibilité (« metamaterial cloak » en langue anglaise) réalisée en un métamatériau. Les lentilles 10 ou 100 peuvent être omises si le système physique est différent.

La fréquence des ondes peut également être différente. Selon le phénomène physique considéré, les ondes peuvent être différentes, voire même omises. Par exemple, les ondes sont des ondes mécaniques telles qu'une onde acoustique de pression ou une onde sismique de surface ou de volume. Les ondes peuvent aussi être des ondes électromagnétiques.

Le phénomène physique peut également ne pas être associé à la propagation d'une onde. Par exemple, il s'agit de diffusion de la chaleur ou de concentration de masse dans un milieu. La valeur $U(\underline{X})$ est alors une valeur de température au point de coordonnées \underline{X} du milieu. Il peut également s'agir de contraintes mécaniques dans un matériau. La valeur $U(\underline{X})$ est alors égale à la valeur de cette contrainte au point de coordonnées \underline{X} .

En variante, le modèle M n'est pas un modèle d'un phénomène physique mais un modèle de phénomène non-physique. Par exemple, la méthode peut être appliquée à des valeurs de cours boursiers. Par exemple, la valeur $U(\underline{X})$ représente une prévision d'un cours boursier pour une ou plusieurs valeurs mobilières et le paramètre p correspond à une date. Le modèle M est un modèle financier tel que le modèle de Blakes et Scholes. On peut ainsi estimer le cours boursier pour deux dates au moyen du modèle M , puis estimer ce cours boursier pour des dates intermédiaires entre ces deux dates au moyen du morphing.

Le paramètre p peut être différent. En variante, il ne s'agit pas d'une quantité scalaire mais d'un vecteur ou d'une matrice.

Le modèle M peut être paramétré par plusieurs paramètres qui varient indépendamment l'un de l'autre. Par exemple, pour deux paramètres a , b qui varient indépendamment l'un de l'autre, on construit quatre images correspondant aux combinaisons suivantes des valeurs de cas paramètres a et b : (a_1, b_1) , (a_1, b_2) , (a_2, b_1) et (a_2, b_2) , où a_1 et a_2 sont respectivement les valeurs de départ et d'arrivée du paramètre a et b_1 et b_2 sont respectivement les valeurs de départ et d'arrivée du paramètre b .

Alors, il est possible de générer une image intermédiaire pour n'importe quelle combinaison de valeurs des paramètres a , b entre leurs valeurs de départ et d'arrivée en répétant l'étape 54 pour prendre en compte séparément les variations des paramètres a et b . Par exemple, pour construire une image intermédiaire correspondant à la combinaison de paramètres (a_i, b_j) , où a_i est une valeur intermédiaire de a comprise entre a_1 et a_2 et b_j est une valeur intermédiaire de b comprise entre b_1 et b_2 , on peut procéder comme suit en construisant successivement :

Morphing appliqué aux simulations numériques dans le cadre de la recherche en sismologie et de la protection des habitats et édifices.

- l'image correspondant à la combinaison (a_1, b_j) par morphing entre les images correspondant aux combinaisons (a_1, b_1) et (a_1, b_2) ;
- l'image correspondant à la combinaison (a_2, b_j) par morphing entre les images correspondant aux combinaisons (a_2, b_1) et (a_2, b_2) ;
- l'image correspondant à la combinaison (a_i, b_j) par morphing entre les images correspondant aux combinaisons (a_1, b_j) et (a_2, b_j) précédemment construites.

Selon une autre variante, lorsqu'il y a plusieurs paramètres, le procédé de morphing de l'étape 54 peut être remplacé par un procédé de morphing par zones à partir de portions d'images multiples, tel que celui décrit dans l'article « Polymorph: Morphing Among Multiple Images » de Seungyong Lee et al, IEEE Computer Graphics and Applications, Février 1998, 18:58-71, DOI : 10.1109/38.637304.

Le milieu 12 peut être différent. Par exemple, il présente une forme et/ou une taille différentes. Il peut également présenter un autre indice de réfraction. Par exemple, le milieu 12 est rempli d'air.

En variante, le milieu est à trois dimensions. Dans ce cas, l'expression du vecteur de coordonnées \underline{X} est modifiée en conséquence.

Le repère R peut être défini différemment. Par exemple, les coordonnées \underline{X} sont des coordonnées curvilignes.

La source 14 peut être différente. Par exemple, l'onde peut être émise dans une direction particulière. La source 14 est adaptée en fonction du type de phénomène physique. La source 14 peut être omise.

La relation R1 peut être définie différemment. Il en va de même pour la relation R2.

Les images numériques peuvent être différentes. Il peut s'agir d'images à trois dimensions ou plus. La valeur de la dimension d est alors modifiée en conséquence. Les tailles (longueur et largeur) des images peuvent être choisies différemment. Dans le cas où les images de départ et d'arrivée présentent des tailles différentes, elles sont avantageusement corrigées préalablement à l'opération 58 afin de présenter des tailles identiques. En effet, pour fonctionner, le procédé de morphing impose que les images aient des tailles identiques.

La résolution peut être différente. En particulier, la résolution en pixels dépend de la finesse du maillage utilisé pour la résolution du modèle M lors des étapes 42 et 48. Les intensités de pixels peuvent être comprises dans d'autres gammes de valeurs. Par exemple, ces images sont encodées sur 24bits ou 32 bits. Les images peuvent également être en couleurs.

Le dispositif 30 peut être réalisé différemment.

Morphing appliqué aux simulations numériques dans le cadre de la recherche en sismologie et de la protection des habitats et édifices.

Les valeurs A, B et C du paramètre p peuvent être différentes. La valeur du taux T1 est alors modifiée en conséquence. On peut également choisir plus de trois valeurs pour le paramètre p. Lorsqu'il y a plus d'une valeur intermédiaire du paramètre p, alors l'étape 54 est exécutée pour chacune de ces valeurs intermédiaires pour construire l'image associée et en déterminer les valeurs $U(\underline{X})$ pour cette valeur du paramètre p.

Le modèle M est préférentiellement adapté en fonction du phénomène physique que l'on souhaite modéliser.

L'opération 56 peut être réalisée différemment. Par exemple, un autre logiciel de morphing peut être utilisé. Les pixels de contrôle peuvent être définis et/ou positionnés selon d'autres critères. Leur nombre peut être différent.

La transformation T n'est pas forcément bijective. Par exemple, on peut définir plusieurs points de contrôle différents qui sont placés à un même emplacement sur l'image de départ, et dont les points de contrôle correspondant dans l'image d'arrivée occupent des emplacements différents. Cependant, un trop grand nombre de tels points (par exemple supérieur à cinq ou à dix) peut avoir pour conséquence de dégrader la qualité de l'étape de morphing et de créer des zones floues sur les images intermédiaires.

La façon de déterminer la transformation T peut être différente. Par exemple, on utilise un maillage triangulaire qui respecte les règles de la triangulation de Delaunay (« Delaunay triangulation » en langue anglaise). En variante, on utilise la méthode connue sous le nom de « mesh warping » en langue anglaise. Par exemple, des maillages rectangulaires topologiquement équivalents sont définis sur les images 46 et 52 à partir des pixels de contrôle respectifs de ces images. Un maillage temporaire est ensuite créé à partir de ces maillages. Le maillage temporaire présente les mêmes valeurs d'ordonnées que le maillage de l'image 46 et les mêmes abscisses que le maillage de l'image 52. Des valeurs d'abscisses sont interpolées à partir des valeurs d'abscisse du maillage de l'image 46 et du maillage temporaire à l'aide d'une fonction de spline. De même, des valeurs d'ordonnées sont interpolées à partir des valeurs d'ordonnées du maillage de l'image 52 et du maillage temporaire.

Lors de l'étape 64, dans le cas où les images sont en couleur et non plus en niveaux de gris, alors les calculs précédemment décrits sont réalisés séparément sur chacune des composantes colorimétriques de chaque image. Par exemple, les images sont de façon connue décomposées selon leurs composantes colorimétriques rouge, bleu et verte (RGB).

L'étape 64 peut être omise. D'autres façons de calculer le taux d'erreur sont possibles lors de l'étape 64. Par exemple, le taux d'erreur est calculé par l'intermédiaire de l'indice SSIM (« Structural Similarity index » en langue anglaise). Cette méthode de calcul est par exemple

Morphing appliqué aux simulations numériques dans le cadre de la recherche en sismologie et de la protection des habitats et édifices.

définie dans l'article de Z. Wang et al. « Image quality assessment: from error visibility to image similarity », IEEE Transactions on Image Processing, 13, p. 600-612, avril 2004. Ainsi, elle ne sera pas décrite ici plus en détails. Cet indice présente ici une valeur comprise entre 0 et 1. La valeur « 1 » de cet indice indique une similarité élevée et donc une faible différence entre les images, alors que la valeur « 0 » indique une absence de similarité et donc un écart important entre ces images.

Par exemple, ce calcul est réalisé au moyen du logiciel « MATLAB® » en utilisant le code « `ssim.m` » disponible en licence « académique » sur le site internet suivant : « <http://ssim.rivetsforbreakfast.com> ».

Cette méthode peut être avantageusement utilisée à la place de la norme L^2 lorsque les images à partir desquelles on calcule le taux d'erreur ne présentent pas les mêmes conditions de luminosité ou de contraste. En effet, la méthode basée sur la norme L^2 ne tient pas compte ni du contraste ni de la luminosité. Par exemple, pour deux images identiques mais présentant une différence de contraste ou de luminosité, alors la méthode basée sur la norme L^2 indiquera une différence d'autant plus importante que la différence de contraste ou de luminosité sera élevée, bien que les images sous-jacentes soient identiques. La méthode SSIM ne présente pas cette limitation.

Ainsi, pour les images 60 et 66, l'indice SSIM calculé présente une valeur égale à 0,9939. On en déduit un taux d'erreur égal à $(1 - 0,9939) * 100 = 0,61$ %.

De même, pour les images 114 et 116, l'indice SSIM calculé présente une valeur égale à 0,9612. On en déduit un taux d'erreur égal à $(1 - 0,9612) * 100 = 3,88$ %.

Selon une variante, les étapes 42 et 44 sont remplacées par une étape d'acquisition de l'image 46 par le calculateur 32, par exemple à partir de valeurs mesurées par un capteur. Les valeurs $U_A(\underline{X})$ sont alors obtenues par mesure du phénomène physique, et non plus par résolution du système d'équations du modèle M. Il en va de même pour les étapes 48 et 50 en référence à l'image 52 et aux valeurs $U_B(\underline{X})$.

Selon une variante avantageuse, le procédé de la figure 4 est utilisé dans des applications en temps réel. Par « temps réel », on désigne des applications dans laquelle le procédé doit pouvoir être mis en œuvre sur un intervalle de temps d'une durée inférieure ou égale à 1 seconde ou à 10ms. Par exemple, ces applications ont pour but de produire un flux d'images vidéo avec une fréquence supérieure ou égale à 24 ou 48 images par seconde.

Dans certaines applications, les images qui forment le flux vidéo doivent être générées par la résolution d'équations d'un modèle à partir de données sources. Ces applications concernent par exemple l'imagerie satellitaire, les simulateurs pilotés, la génération d'images de synthèse,

Morphing appliqué aux simulations numériques dans le cadre de la recherche en sismologie et de la protection des habitats et édifices.

le pilotage à distance de drones ou de véhicules sans pilote, ou plus généralement les systèmes multidimensionnels. De tels exemples sont par exemple décrits dans les documents suivants :

- « Smooth contour coding with minimal description length active grid segmentation techniques » de F. Galland et al., Pattern Recognition Letters , Vol. 32, Issue 5, (2011), p. 721-730 ;
- « Information theory based approach for contrast analysis in Polarimetric and/or Interferometric SAR images » de J. Morioet al; IEEE Transactions on Geoscience and Remote Sensing , Vol. 46 , Issue 8 , (2008) ;
- « Stochastic complexity integral image based technique for fast video tracking » ; J-F. Boulanger et al., Optics Letters, Vol. 33, Issue 21, (2008), pp. 2521-2523 ;
- « Maximum-likelihood estimation of an astronomical image from a sequence at low photon levels » de M. Guillaume et al., Journal of the Optical Society of America A , Vol. 15 (11), (1998), p. 2841-2848.

Des systèmes multi-dimensionnels sont par exemple décrits dans l'ouvrage « Multidimensional Systems Theory, Progress, Directions and Open Problems in Multidimensional Systems » de N.K. Bose, ed., D. Reidel Publishing Company, 1985.

Typiquement, la résolution des équations d'un tel modèle pour générer ces images est coûteuse en ressources informatiques et surtout en temps de calcul. Elle est de fait difficilement compatible avec les exigences de systèmes en temps réel, car la génération des images prend trop de temps. Or, il est primordial d'éviter que le flux d'images vidéo présente des saccades ou des interruptions.

En utilisant le procédé, seule une partie des images du flux vidéo est générée par la résolution des équations du modèle, ce qui réduit le temps de calcul. Les autres images du flux vidéo sont des images intermédiaires générées grâce aux étapes de morphing. Le flux vidéo présente ainsi une fluidité visuelle satisfaisante tout en conservant une bonne qualité.

REVENDECATIONS

Procédé de détermination des valeurs $U(\underline{X})$ d'un phénomène physique dans un milieu, ce phénomène physique étant modélisé par un modèle physique linéaire, de sorte que chaque valeur $U(\underline{X})$ soit la solution d'un système d'équations linéaires qui relie entre elles les coordonnées \underline{X} d'un point du milieu, la valeur $U(\underline{X})$ du phénomène physique en ce point et un paramètre p du modèle, la valeur du paramètre p étant indépendante des coordonnées \underline{X} , ce procédé comportant :

a) le calcul automatique (42) de valeurs $U(\underline{X})$ du phénomène physique pour une première valeur A du paramètre, ce calcul comportant la résolution du système d'équations avec la première valeur A du paramètre, pour calculer des valeurs $U(\underline{X})$ en différents points du milieu,

b) la construction (44) d'une image numérique de départ (46) du phénomène physique, formée d'une pluralité de pixels, dans laquelle :

- la position de chaque pixel est reliée, par une première relation (R1) prédéfinie, aux coordonnées \underline{X} d'un point du milieu pour lequel une valeur $U(\underline{X})$ a été calculée lors de l'étape a), et
- l'intensité de chaque pixel de cette image numérique est reliée, par une seconde relation (R2) prédéfinie, à la valeur $U(\underline{X})$ calculée pour le point du milieu auquel ce pixel est relié par la première relation prédéfinie ;

c) le calcul automatique (48), des valeurs $U(\underline{X})$ du phénomène physique pour une seconde valeur B du paramètre, distincte de la première valeur A , ce calcul comportant la résolution du système d'équations avec la seconde valeur B du paramètre, pour calculer des valeurs $U(\underline{X})$ pour les mêmes points du milieu que lors de l'étape a), et

d) la construction (50) d'une image numérique d'arrivée (52) du phénomène physique, formée d'une pluralité de pixels, dans laquelle :

- la position de chaque pixel est reliée, par la première relation prédéfinie, aux coordonnées \underline{X} du point du milieu pour lequel une valeur $U(\underline{X})$ a été calculée lors de l'étape c), et
- l'intensité de chaque pixel de cette image numérique est reliée par, la seconde relation prédéfinie, à la valeur $U(\underline{X})$ pour le point du milieu auquel ce pixel est relié par la première relation prédéfinie ;

Morphing appliqué aux simulations numériques dans le cadre de la recherche en sismologie et de la protection des habitats et édifices.

e) la création (54) d'une image intermédiaire (60) du phénomène physique pour une troisième valeur C du paramètre comprise entre les première A et seconde B valeurs ;

le procédé étant caractérisé en ce que l'étape e) comporte :

- le calcul (56) d'un taux T1 de morphing au moyen de la formule suivante : $T1 = 100 * (C - A) / (B - A)$, ce taux T1 étant exprimé en pourcentage ;
- la construction (58) de l'image intermédiaire, en exécutant un procédé de morphing entre les images de départ et d'arrivée avec le taux T1, les intensités des pixels de cette image intermédiaire étant reliées par la seconde relation prédéfinie aux valeurs $U(\underline{X})$ du phénomène physique au niveau des mêmes points du milieu que ceux pour lesquels des valeurs $U(\underline{X})$ ont été calculées lors des étapes a) et c), sans avoir à résoudre le système d'équations pour la troisième valeur C du paramètre p.

1. Procédé selon la revendication 1, dans lequel le phénomène physique dépend d'une fréquence, le paramètre p du modèle étant cette fréquence.

2. Procédé selon la revendication 1, dans lequel la valeur $U(\underline{X})$ est choisie dans le groupe composé de l'amplitude ou la phase d'une onde, la température du milieu, une contrainte mécanique au sein du milieu.

3. Procédé selon la revendication 1, dans lequel le phénomène physique dépend d'un instant t du temps auquel il est mesuré, le paramètre p du modèle étant cet instant t.

4. Procédé selon la revendication 1, dans lequel le phénomène physique dépend d'une forme géométrique au sein du milieu, le paramètre p du modèle étant un paramètre géométrique caractéristique de cette forme géométrique.

5. Procédé selon l'une quelconque des revendications précédentes, dans lequel, lors de l'étape e), la construction (58) de l'image intermédiaire au moyen du procédé de morphing comporte :

- l'acquisition d'une pluralité de pixels de contrôle à l'intérieur de l'image de départ et d'une pluralité de pixels de contrôle correspondants à l'intérieur de l'image d'arrivée,
- la détermination automatique, à partir des seuls pixels de contrôle des images de départ et d'arrivée, d'une transformation linéaire qui transforme chaque pixel de contrôle de l'image de départ en un pixel de contrôle correspondant de l'image d'arrivée ;

Morphing appliqué aux simulations numériques dans le cadre de la recherche en sismologie et de la protection des habitats et édifices.

- l'application de ladite transformation linéaire, pondérée par le taux T1 de morphing, sur chaque pixel de l'image de départ, pour obtenir les pixels respectifs de l'image intermédiaire.

Procédé selon l'une quelconque des revendications précédentes, dans lequel le procédé comporte en outre :

- le calcul automatique (64) des valeurs $U(\underline{X})$ du phénomène physique pour la troisième valeur C du paramètre, ce calcul comportant la résolution du système d'équations avec la troisième valeur C du paramètre, pour calculer des valeurs $U(\underline{X})$ pour les mêmes points du milieu que lors des étapes a) et c), et
- la construction d'une image numérique de contrôle, formée d'une pluralité de pixels, dans laquelle :
 - la position de chaque pixel est reliée par la première relation prédéfinie aux coordonnées \underline{X} du point du milieu pour lequel une valeur $U(\underline{X})$ a été calculée, et
 - l'intensité de chaque pixel de cette image de contrôle est reliée par la seconde relation prédéfinie à la valeur $U(\underline{X})$ pour le point du milieu auquel ce pixel est relié par la première relation prédéfinie ;
- l'estimation (64) d'un taux d'erreur sur les intensités des pixels de l'image intermédiaire, ce taux d'erreur étant estimé à partir de différences entre les intensités des pixels de l'image intermédiaire et de l'image de contrôle reliés au même point du milieu par la première relation.

Procédé selon la revendication 7, lequel comporte le calcul (62) d'au moins une valeur $U(\underline{X})$ en un point du milieu, pour la valeur C du paramètre p, à partir de l'intensité du pixel relié à ce point du milieu par la première relation prédéfinie et à l'aide de la seconde relation prédéfinie.

Support d'enregistrement d'informations (34), caractérisé en ce qu'il comporte des instructions pour l'exécution d'un procédé conforme à l'une quelconque des revendications précédentes lorsque ces instructions sont exécutées par un calculateur électronique.

Calculateur électronique (32) pour la mise en œuvre de l'une quelconque des revendications 1 à 8, pour déterminer des valeurs $U(\underline{X})$ d'un phénomène physique dans un milieu (12), ce phénomène physique étant modélisé par un modèle physique (M) linéaire comportant un paramètre p du modèle, la valeur du paramètre p étant indépendante de la valeur $U(\underline{X})$, de sorte que chaque valeur $U(\underline{X})$ soit la solution d'un système d'équations linéaires qui relie entre

Morphing appliqué aux simulations numériques dans le cadre de la recherche en sismologie et de la protection des habitats et édifices.

elles les coordonnées \underline{X} d'un point du milieu, le paramètre p et la valeur $U(\underline{X})$ du phénomène physique en ce point, ce calculateur étant programmé pour :

a) calculer automatiquement des valeurs $U(\underline{X})$ du phénomène physique pour une première valeur A du paramètre, ce calcul comportant la résolution du système d'équations avec la première valeur A du paramètre, pour calculer des valeurs $U(\underline{X})$ en différents points du milieu,

b) construire une image numérique de départ (46) du phénomène physique, formée d'une pluralité de pixels, dans laquelle :

- la position de chaque pixel est reliée par une première relation prédéfinie aux coordonnées \underline{X} d'un point du milieu pour lequel une valeur $U(\underline{X})$ a été calculée lors de l'étape a), et

- l'intensité de chaque pixel de cette image numérique est reliée par une seconde relation prédéfinie à la valeur $U(\underline{X})$ calculée pour le point du milieu auquel ce pixel est relié par la première relation prédéfinie ;

c) calculer automatiquement, des valeurs $U(\underline{X})$ du phénomène physique pour une seconde valeur B du paramètre, distincte de la première valeur A , ce calcul comportant la résolution du système d'équations avec la seconde valeur B du paramètre, pour calculer des valeurs $U(\underline{X})$ pour les mêmes points du milieu que lors de l'étape a), et

d) construire une image numérique d'arrivée (52) du phénomène physique, formée d'une pluralité de pixels, dans laquelle :

- la position de chaque pixel est reliée par la première relation prédéfinie aux coordonnées \underline{X} du point du milieu pour lequel une valeur $U(\underline{X})$ a été calculée lors de l'étape c), et

- l'intensité de chaque pixel de cette image numérique est reliée par la seconde relation prédéfinie à la valeur $U(\underline{X})$ pour le point du milieu auquel ce pixel est relié par la première relation prédéfinie ;

e) créer une image intermédiaire (60) du phénomène physique pour une troisième valeur C du paramètre comprise entre les première A et seconde B valeurs ;

le calculateur étant caractérisé en ce qu'il est programmé pour que l'étape e) comporte :

- le calcul d'un taux $T1$ de morphing au moyen de la formule suivante : $T1 = 100 * (C - A) / (B - A)$, ce taux $T1$ étant exprimé en pourcentage ;

la construction de l'image intermédiaire, en exécutant un procédé de morphing entre les images de départ et d'arrivée avec le taux $T1$, les intensités des pixels de cette image

Morphing appliqué aux simulations numériques dans le cadre de la recherche en sismologie et de la protection des habitats et édifices.

intermédiaire étant reliées par la seconde relation prédéfinie aux valeurs $U(\underline{X})$ du phénomène physique au niveau des mêmes points du milieu que ceux pour lesquels des valeurs $U(\underline{X})$ ont été calculées lors des étapes a) et c), sans avoir à résoudre le système d'équations pour la troisième valeur C du paramètre p.

1/4

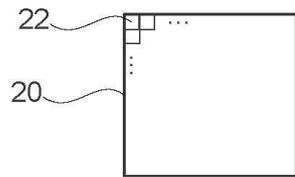
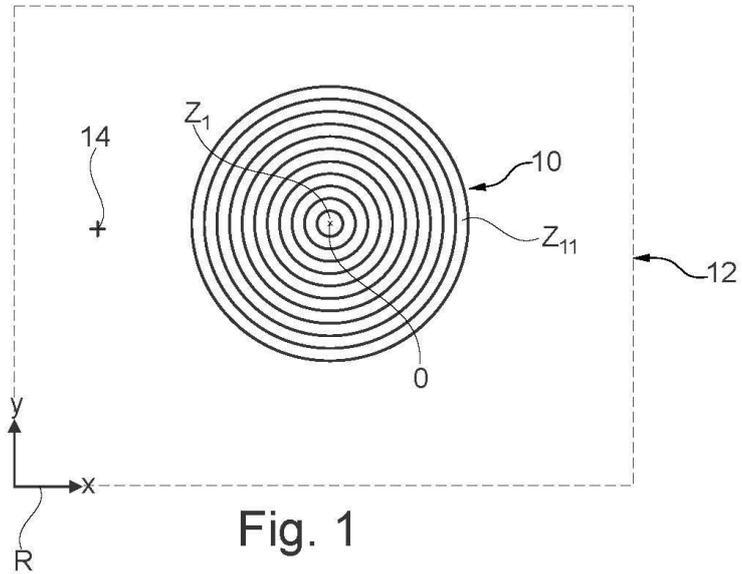


Fig. 2

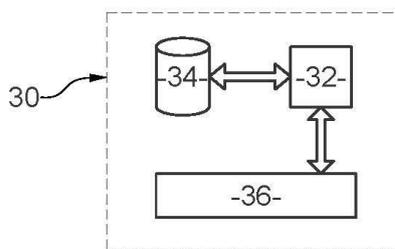


Fig. 3

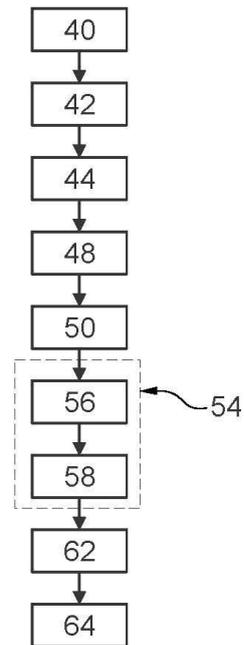
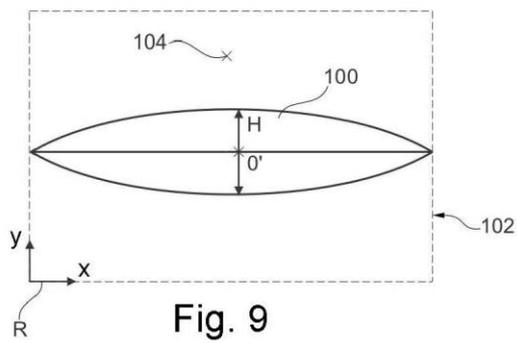
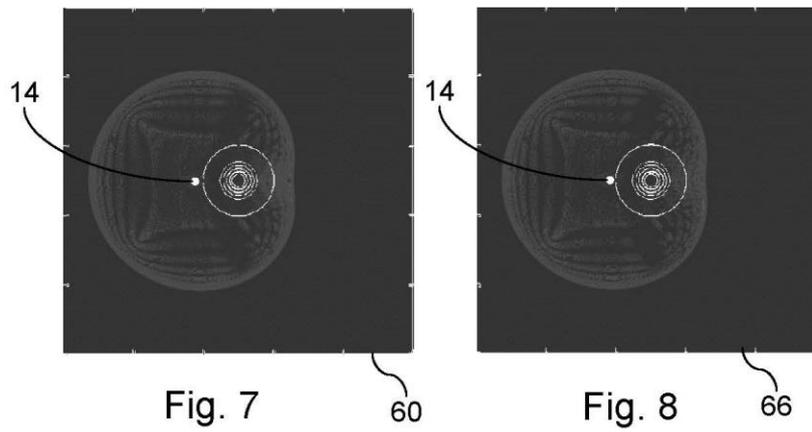
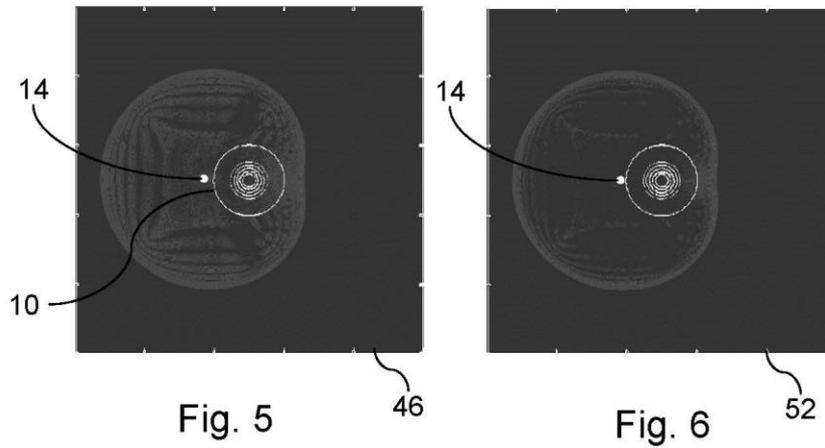


Fig. 4

2/4



3/4

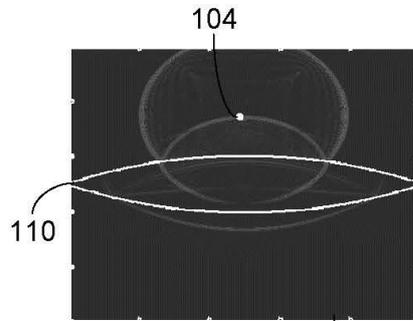


Fig. 10A 110

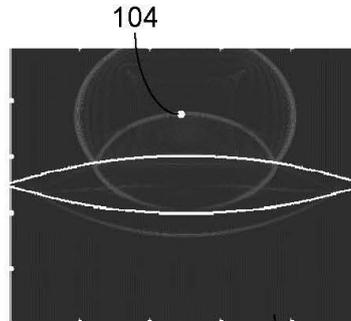


Fig. 10B 112

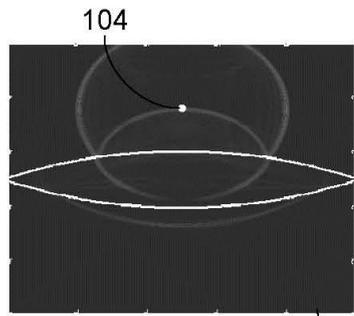


Fig. 10C 114

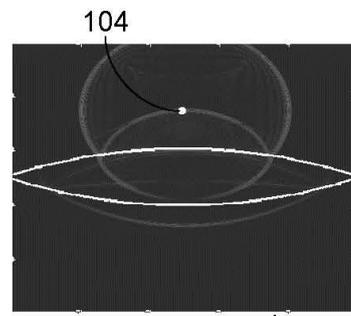


Fig. 10D 116

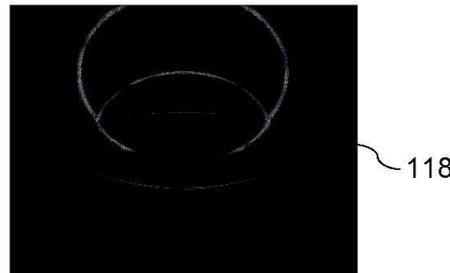


Fig. 10E

4/4

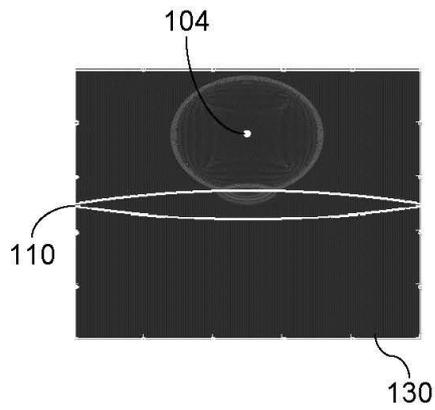


Fig. 11A

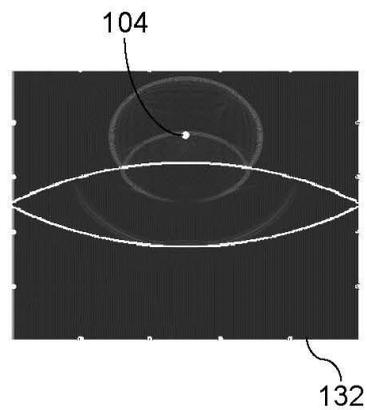


Fig. 11B

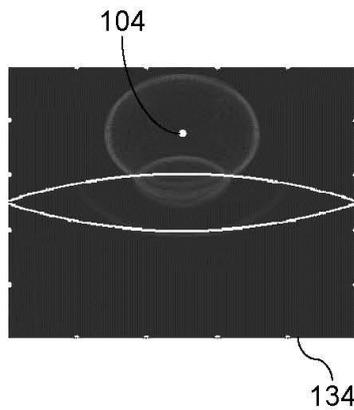


Fig. 11C

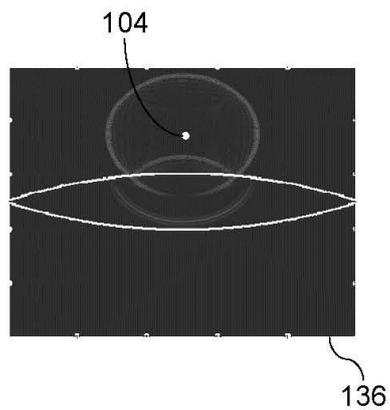


Fig. 11D

Annexe II



L'INTERFACE PRIVILÉGIÉE ENTRE LES ENTREPRISES ET LA RECHERCHE PUBLIQUE EN RÉGIONS PACA ET CORSE



SIMULATION SPEEDUP

ACCÉLÉRATEUR DE CALCUL NUMÉRIQUE

AVANTAGES

RÉDUCTION DU TEMPS DE CALCUL EN SIMULATION NUMÉRIQUE
TAUX D'ERREUR <1%

MOTS-CLÉS

SIMULATION NUMÉRIQUE
PROCÉDÉ DE CALCUL

STATUT PI

Brevet Déposé



PARTENARIATS

LICENCE ET/OU COLLABORATION R&D (POSSIBILITÉ DE CO-FINANCEMENT)

CONTACT

licensing@sattse.com
tel +33 (0)4 13 24 66 16

www.sattse.com

CONTEXTE

'Simulation Speedup' est une technologie permettant d'accélérer fortement vos simulations numériques, dans de nombreux domaines (physiques des ondes, mécanique, thermique,...), et différentes méthodes (FEA, FDTD,...).

En s'inspirant de techniques d'effets spéciaux audiovisuels, la technologie permet de diviser le temps de calcul par 2, par 10, ou par 100, suivant la complexité des modèles.

AVANTAGES VS. ETAT DE L'ART

Aujourd'hui, différentes techniques existent pour réaliser des batteries de simulations numériques, en faisant varier un ou plusieurs paramètres.

Ce type d'étude de sensibilité (Design Of Experiment) permet de dimensionner votre produit pour garantir sa fonctionnalité et sa durée de vie.

Mais ces calculs sont coûteux en temps : dans les méthodes existantes, le temps de calcul est multiplié par le nombre de cas calculés.

Inspirée par des techniques éprouvées dans le cinéma et les effets spéciaux, la technologie Simulation Speedup permet de rompre avec ce principe. Simulez les deux cas extrêmes de votre étude, et obtenez tous les cas intermédiaires... en quelques minutes !

La force de cette technologie est également de ne pas nécessiter une puissance de calcul importante : tous les cas intermédiaires peuvent être calculés par une machine annexe (ordinateur classique), libérant ainsi la mémoire de votre cluster de calcul pour d'autres tâches.

Exemple d'application : simulation d'ondes sismiques 2D



30min



30min



30min

Simulation Speedup !



5min

Développement

- Des tests ont été effectués pour différentes applications
- Des taux d'erreur inférieurs à 1% ont été constatés

APPLICATIONS

- Etude de sensibilité
- Dimensionnement
- Calculs de première approche
- Retro engineering

© 2012 SATT PACA Corse SAS. Tous droits réservés.
SATT PACA Corse SAS au capital de 1 M€ | RCS Marseille 539 768 085 00018 | APE 7219Z | Mise à jour Juil. 2014



Annexe III

Morphing appliqué aux simulations numériques dans le cadre de la recherche en sismologie et de la protection des habitats et édifices.

```
#include <stdio.h>
#include <stdlib.h>
#include <math.h>

#define BUF_MAX 10000
#define SEUIL 32

int main(){

    FILE *S, *Res;
    unsigned char Sentete[54], B[5], G[5], R[5], Sline[BUF_MAX],
Rline[BUF_MAX], top;
    unsigned int i, j, Scoul, Lmod4;
    unsigned long int Staille, Largeur;
    long taille_avant, taille_apres;
    int k;
    float Ub, Ug, Ur;
    double sommeUb, sommeUg, sommeUr;
    size_t retour;
    char *ret;

    system("clear");

    if((S=fopen("Différence dégradés de gris bis.bmp","r"))==NULL){

        printf("Fichier 'Différence dégradés de gris bis.bmp'
introuvable\n");
        return(EXIT_FAILURE);

    }

    ret=NULL;
    ret=fgets(Sentete,54,S);
    if(ret==NULL){

        printf("Echec de lecture de l'entête de 'Différence dégradés de
gris bis.bmp'...\n");
        return(EXIT_FAILURE);

    }

    i=0;
    Staille=0;
    while(i<4){

        Staille=(256*Staille)+Sentete[21-i];
        i++;

    }

    Largeur=Staille;
    i=0;
    Staille=0;
    while(i<4){
```

```
    Staille=(256*Staille)+Sentete[25-i];
    i++;

}

i=0;
Scoul=0;
while(i<2){

    Scoul=(256*Scoul)+Sentete[29-i];
    i++;

}

// Attention : en 24 Bits, la largeur de l'image doit être un
multiple de 4
// Lmod4 sera le complément éventuellement nécessaire, à ajouter
aux 3 octets,
// soient 24 Bits, par pixel, en largeur, pour avoir une largeur
multiple de 4.

Lmod4=0;

if((3*Largeur)%4)
    Lmod4=(4-((3*Largeur)%4));

if(((3*Largeur)+Lmod4)>BUF_MAX){

    printf("Stack overflow : images trop grandes pour un buffer de
%d octets...\n",BUF_MAX);
    printf("Réduisez les images ou augmentez la taille du buffer
dans #define BUF_MAX.\n");
    printf("Taille d'une ligne des images sources : Largeur = %lu,
Complément = %u, avec 3 octets par pixel, ce qui fait un total de
%lu octets...\n",Largeur,Lmod4,((3*Largeur)+Lmod4));
    return(EXIT_FAILURE);

}

if((Res=fopen("Résultat.bmp","wb"))==NULL){

    printf("Impossible de créer le fichier Résultat.bmp ...\n");
    return(EXIT_FAILURE);

}

taille_avant=0;
taille_avant=ftell(Res);

retour=0;
retour=fwrite(Sentete,sizeof(Sentete),1,Res);

if(retour<0){
```

Morphing appliqué aux simulations numériques dans le cadre de la recherche en sismologie et de la protection des habitats et édifices.

```
printf("Echec d'enregistrement de l'entête dans Résultat.bmp...\n");
return(EXIT_FAILURE);

}

taille_apres=0;
taille_apres=ftell(Res);

if((taille_apres-taille_avant)!=54){

printf("Erreur d'écriture d'entête dans Résultat.bmp : %ld
octets enregistrés au lieu de 54 octets...\n",taille_apres-
taille_avant);
return(EXIT_FAILURE);

}

j=0;
sommeUb=0.0;
sommeUg=0.0;
sommeUr=0.0;
while(j<Staille){

k=0;
k=fread(Sline,sizeof(unsigned char),((3*Largeur)+Lmod4),S);
if(ret==0){

printf("Echec de lecture dans 'Différence dégradés de gris
bis.bmp'...\n");
return(EXIT_FAILURE);

}

i=0;
while(i<Largeur){

Ub=(float)Sline[(3*i)+0]/255.0;
Ub*=Ub;
sommeUb+=(double)Ub;

Ug=(float)Sline[(3*i)+1]/255.0;
Ug*=Ug;
sommeUg+=(double)Ug;

Ur=(float)Sline[(3*i)+2]/255.0;
Ur*=Ur;
sommeUr+=(double)Ur;

Rline[(3*i)+0]=Sline[(3*i)+0];
Rline[(3*i)+1]=Sline[(3*i)+1];
Rline[(3*i)+2]=Sline[(3*i)+2];

i++;

}

}
```

```
i=0;
while (i<Lmod4) {

    Rline[(3*Largeur)+i]=0;
    i++;

}

retour=0;
retour=fwrite(Rline, (3*Largeur)+Lmod4, 1, Res);

if(retour<0) {

    printf("Echec écriture dans Résultat.bmp ... \n");
    return (EXIT_FAILURE);

}

j++;

}

sommeUb*=(double)1/(Staille*Largeur);
sommeUb=sqrt(sommeUb);

sommeUg*=(double)1/(Staille*Largeur);
sommeUg=sqrt(sommeUg);

sommeUr*=(double)1/(Staille*Largeur);
sommeUr=sqrt(sommeUr);

printf("Normale L2 Bleue : %f \n", sommeUb);
printf("Normale L2 Verte : %f \n", sommeUg);
printf("Normale L2 Rouge : %f \n", sommeUr);

fclose(S);
fclose(Res);

return 0;

}
```

Bibliographie

- [1] <http://arxiv.org/pdf/1509.04094.pdf>
- [2] http://cmoiii5.free.fr/parasismique/partie_2.php
- [3] https://fr.wikipedia.org/wiki/Taipei_101
- [4] <http://www.amusingplanet.com/2014/08/the-728-ton-tuned-mass-damper-of-taipei.html>
- [5] <http://notech.franceserv.com/batiments-a-etages.html>
- [6] Extrait de vidéo <https://www.youtube.com/watch?v=J2eHCxB-K7s>
- [7] <http://www.memoireonline.com/01/13/6828/Effets-des-dispositifs-d-amortissement-sur-les-deplacements-vitesses-et-accelerations-des-struct.html>
- [8] <http://planet-terre.ens-lyon.fr/article/pendule.xml>
- [9] TERZOPOULOS D., PLATT J., BARR A., FLEISCHER K., 1987. Elastically deformable models. *Computer Graphics*, **21**, 205-214.
- [10] HECKBERT P. S., 1989. *Fundamentals of texture mapping and image warping*. Master's Thesis of Electrical Engineering and Computer Science, University of California, Berkeley, CA 94720, 86 p.
- [11] EL HABACHI A., 2011. *Propagation de la variabilité de la morphologie humaine sur le Débit d'Absorption Spécifique en dosimétrie numérique*. Thèse de Doctorat en Physique, Supélec, 147 p.
- [12] VAXMAN A., 2011. *General Techniques for Interpolation, Reconstruction, and Morphing of Polyhedral Surfaces*. Thesis of Computer Science Department, Technion, 90 p.
- [13] <http://www.rbf-morph.com/>
- [14] http://python.sm.u-bordeaux2.fr/ter/2009/sc/foloppe/index.php?p=I_Mod
- [15] BRÛLÉ S., JAVELAUD E.H., ENOCH S., GUENNEAU S., 2014. Experiments on seismic metamaterials: molding surface waves. *Phys. Rev. Lett.*, **112**, 133901.
- [16] WANG Z., BOVIK A.C., SHEIKH H.R., SIMONCELLI E.P., 2004. Image quality assessment: from error visibility to structural similarity. *IEEE Transactions on Image Processing*, **13-4**, 600-612.

Liste des figures

Figure 1 :	Exemple d'amortisseurs de type « visqueux » ² .	Page 9
Figure 2 :	Exemple de contrepoids ⁴ .	Page 10
Figure 3 :	Exemple de « contreventements » ⁵ .	Page 10
Figure 4 :	Exemple de rails coulissants ⁶ .	Page 11
Figure 5 :	Exemple d'un appui à roulement ⁷ .	Page 11
Figure 6 :	Illustration des quatre types d'ondes sismiques ⁸ .	Page 12
Figure 7 :	Une onde plane envoyée du bord gauche vers le bord droit : à la sortie de l'obstacle, l'onde n'est plus plane, donc, par cette déformation, l'obstacle est visible pour un observateur qui se trouverait sur le bord droit. Il n'y a pas de protection de l'obstacle.	Page 14
Figure 8 :	Même configuration que dans la figure précédente à l'exception de l'obstacle qui, maintenant, est entouré d'une « cape d'invisibilité ». L'onde ne traverse pas l'obstacle, donc cet obstacle est protégé, et en sortie de cape, l'onde redevient plane, donc l'obstacle est invisible pour un observateur qui se trouverait sur le bord droit.	Page 14
Figure 9 :	Sur la droite, une foreuse simule une onde sismique de 50 Hz, au milieu trois rangées de trous de 30 cm de diamètre, 5 mètres de profondeur, espacés de 1,5 m, et sur la gauche des capteurs (des vélocimètres) ¹⁴ .	Page 16
Figure 10 :	Exemple de maillage selon la triangulation de Delaunay.	Page 19
Figure 11 :	La maille triangulaire représentée en rouge dans le maillage de gauche (image source) se transforme en une maille triangulaire représentée en rouge dans le maillage de droite (image de destination).	Page 19
Figure 12 :	Exemple de distorsions basées sur les caractéristiques des images.	Page 22
Figure 13 :	Exemple de maillage « carré », formé par des quadrilatères.	Page 23
Figure 14 :	Illustration des changements de coordonnées par abscisses puis	Page 24

par ordonnées¹⁵.

- Figure 15 : Propagation d'une onde électromagnétique planaire, de gauche à droite, incidente sur une cape d'invisibilité de forme circulaire en (a), de forme elliptique en (b), et d'une forme elliptique en (c) avec une excentricité intermédiaire entre celle du cercle en (a) et celle de l'ellipse en (b). Enfin, en (d) on a le résultat produit par le morphing entre (a) et (b). Ce résultat s'avère proche de celui obtenu en (c). Page 29
- Figure 16 : Illustration des différentes épaisseurs de lentille avec $H = 2,5$ cm en (a), $H = 5$ cm en (b), et $H = 7,5$ cm en (c). Page 30
- Figure 17 : Lentille d'épaisseur $H = 2,5$ cm en (a), $H = 7,5$ cm en (b), $H = 5$ cm en (c) et (d). Tous les résultats ont été relevés à $t = 140 \mu\text{s}$. Il est à noter que ces résultats sont calculés sauf en (d) qui est le résultat du morphing entre (a) et (b). Il semblerait que les résultats (c) et (d) soient assez proches. Page 31
- Figure 18 : Lentilles d'épaisseurs $H = 5$ cm en (a), (b), (c) et (d), mais à des instants différents : à $t = 190 \mu\text{s}$ en (a), $t = 200 \mu\text{s}$ en (b), et $t = 195 \mu\text{s}$ en (c) et (d). Il est à noter que ces résultats sont calculés sauf en (d) qui est le résultat du morphing entre (a) et (b). Il semblerait que les résultats (c) et (d) soient assez proches. Page 32
- Figure 19 : Lentille de Luneberg constituée de cercles concentriques de densités d'autant plus importantes que ces cercles sont proches du centre de ces cercles. Le cercle rouge, le plus au centre a une densité de $3,36 \text{ t.m}^{-3}$, et le cercle le plus extérieur en bleu foncé a une densité de $1,76 \text{ t.m}^{-3}$. Le milieu extérieur à la lentille a une densité de $1,6 \text{ t.m}^{-3}$. Le point source de l'onde émise est représenté en blanc. Page 33
- Figure 20 : Ondes au centre émises à $f = 25$ kHz en (a), à $f = 35$ kHz en (b), et à $f = 30$ kHz en (c) et (d). Tous les résultats sont calculés sauf (d) qui représente le morphing entre (a) et (b). Il semblerait que les résultats (c) et (d) soient assez proches. Page 34
- Figure 21 : Résultats de la norme L^2 en fonction du pourcentage de pixels « blancs » présents dans toute l'image. Page 37

- Figure 22 : Diagramme de fonctionnement de la mesure S.SIM.¹⁶ montrant que pour comparer une zone d'image « x » à une zone d'image « y » il y a trois critères de mesure, à savoir, la luminosité, le contraste, et la structure, et que cette dernière est considérée comme une combinaison de luminosité et de contraste. Page 39
- Figure 23 : Figure 17(c) en dégradés de gris en (a), Figure 17(d) en dégradés de gris en (b), en (c) l'image de différence entre (a) et (b). Page 40
- Figure 24 : Figure 15(c) en dégradés de gris en (a), Figure 15(d) en dégradés de gris en (b), en (c) l'image de différence entre (a) et (b). Page 41
- Figure 25 : Figure 18(c) en dégradés de gris en (a), Figure 18(d) en dégradés de gris en (b), en (c) l'image de différence entre (a) et (b). Page 42
- Figure 26 : Figure 20(c) en dégradés de gris en (a), Figure 20(d) en dégradés de gris en (b), en (c) l'image de différence entre (a) et (b). Page 42
- Figure 27 : « Super diffuseur » de rayon le plus élevé en (a), de rayon le plus bas en (b), de rayon intermédiaire en (c) et (d). Tous les résultats sont calculés sauf celui en (d) qui représente le morphing entre (a) et (b). A l'œil nu, on remarque qu'il y a peu de ressemblance entre (c) et (d). Page 44
- Figure 28 : Figure 27(c) en dégradés de gris en (a), Figure 27(d) en dégradés de gris en (b), en (c) l'image de différence entre (a) et (b). Page 45
- Figure 29 : Triangle équilatéral de hauteur H. En jaune, le point source des ondes émises. La longueur de la hauteur H sera modifiée pour obtenir différents triangles isocèles, toutefois, le point source des ondes émises restera toujours au centre de gravité des triangles isocèles. Page 45
- Figure 30 : Si H est la longueur de la hauteur du triangle équilatéral, alors on a une hauteur de $\frac{5}{3} \times H$ en (a), de $2 \times H$ en (b), et de $\frac{11}{6} \times H$ en (c) et (d). Tous les résultats sont calculés sauf en (d) qui Page 46

représente le résultat du morphing entre (a) et (b). A l'œil nu on remarque des différences entre (c) et (d), mais il serait difficile de prétendre que ces différences soient importantes...

Figure 31 : Figure 30(c) en dégradés de gris en (a), Figure 30(d) en dégradés de gris en (b), en (c) l'image de différence entre (a) et (b). Page 47

Résumé

Protéger des tremblements de terre des bâtiments et des édifices revient à résoudre des équations de la mécanique, particulièrement complexes, au vu des paramètres à prendre en compte. Il va de soi que de tels calculs ne seraient pas envisageables sans matériel informatique. Malgré les avancées technologiques, des fibres optiques aux nanotechnologies, ces calculs restent néanmoins extrêmement chronophages et gourmands en ressources informatiques.

L'idée est de détourner l'usage du morphing, un des effets spéciaux issus du monde cinématographique, pour réduire considérablement à la fois les temps de calculs ainsi que l'importance des ressources informatiques.

En procédant à l'analyse du fonctionnement des logiciels de morphing et en le comparant au fonctionnement des logiciels de simulations numériques dans le domaine de la sismique, il apparaît possible d'obtenir des résultats, par le morphing, assez proches de ceux calculés par ces simulations numériques, étude quantitative à l'appui.

En considérant que le morphing fonctionne indépendamment de toute équation de la physique, tout en respectant des règles mathématiques simples, en l'occurrence, des interpolations, on arrive à la conclusion qu'il peut être appliqué à plusieurs domaines de la physique.

Mots clés : morphing, élastodynamique, calcul scientifique, interpolation, protection, sismique.

Summary

To protect buildings and human infrastructures from earthquakes means solving elastodynamic equations, which are particularly complex, in view of the parameters that need to be taken into account. It is obvious that such calculations would not be possible without computer hardware. In spite of technological breakthroughs, from optical fibers to the nanotechnologies, these calculations remain nevertheless time-consuming and require significant resources in computing.

The idea is to give a twist to usual applications of morphing, a special effect stemming from the world of movies, so as to reduce considerably both calculation time and computing resources.

Analyzing the way morphing works and by comparison with the algorithm of numerical simulations used in the field of seismic waves, it seems possible to obtain almost instantaneous results, by the morphing, rather close to those calculated by these numerical simulations, as confirmed by a quantitative analysis.

By considering that morphing works irrespective of governing equations in physics, while respecting simple mathematical rules, in this particular case interpolations, we come to the conclusion that it can be applied to miscellaneous areas of physics.

Key words: morphing, elastodynamics, scientific computing, interpolation, protection, seismic.