



**HAL**  
open science

## Calcul de champ ultrasonore interactif pour le contrôle non destructif

Jason Lambert, Gilles Rougeron, Lionel Lacassagne

► **To cite this version:**

Jason Lambert, Gilles Rougeron, Lionel Lacassagne. Calcul de champ ultrasonore interactif pour le contrôle non destructif: modèles et méthodes de simulation de contrôle non-destructif par ultrason massivement parallèles. LES JOURNÉES COFREND 2014, May 2014, Bordeaux, France. . hal-01093131

**HAL Id: hal-01093131**

**<https://inria.hal.science/hal-01093131>**

Submitted on 10 Dec 2014

**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.

# CALCUL DE CHAMP ULTRASONORE INTERACTIF POUR LE CONTRÔLE NON DESTRUCTIF

J. LAMBERT<sup>1</sup>, G. ROUGERON<sup>1</sup>, L. LACASSAGNE<sup>2</sup>

<sup>1</sup> CEA LIST, CEA Saclay - Digiteo Labs, PC120, 91191 Gif-sur-Yvette cedex, France.  
<sup>2</sup> Laboratoire de Recherche en Informatique, Université Paris-Sud, F-91405 Orsay, France

## Contexte

### Le Contrôle Non Destructif (CND)

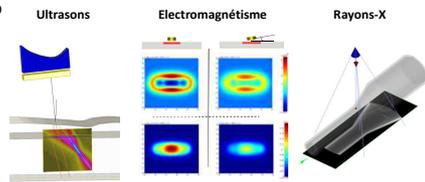
Ensemble des techniques non invasives utilisées pour la détection de défauts dans des pièces industrielles

- Examens en production et à la maintenance
- Nombreux secteurs d'application (énergie, pétrochimie, aéronautique, transports...)
- Enjeux importants financiers et de sécurité
- Multi-techniques : ultrasons, courants de Foucault, radiographie X ou gamma...



### CIVA

- Plateforme de simulation et d'analyse CND
- Conception de nouvelles méthodes d'inspection et de nouveaux capteurs
- Qualification de méthodes
- Interprétation de résultats complexes
- Tests Virtuels et conception de pièces
- Formation des opérateurs
- 200 clients, distribué mondialement par EXTENDE, nombreux contextes et cas d'utilisation.



## Simulation de champ

### Principes généraux du calcul de champ en un point

#### Calcul des pinceaux

Capturer échantillonné  
Recherche d'un trajet valide selon les lois de Snell-Descartes  
Construction du pinceau (matrice de divergence...)

#### Prise en compte des retards et formation de la Réponse Impulsionnelle

Décalage par les retards  
Somme des contributions des pinceaux sur la Réponse Impulsionnelle (RI)

#### Extraction de l'amplitude

Convolution avec le signal du transducteur  
Extraction du module de déplacement  
Recherche du maximum d'amplitude



### Calcul des trajets

- Capteur conforme : calcul géométrique direct
- Capteur en immersion ou contact adapté :
  - Application de la loi de Snell-Descartes à l'interface
  - Résoudre  $\frac{x_1 - x_1'}{c_1 \sqrt{(x_1 - x_1')^2 + z_1^2}} = \frac{x_1' - X}{c_2 \sqrt{(x_1' - X)^2 + z_2^2}}$  en X à l'aide de la méthode de Newton pour obtenir le trajet (méthode itérative)

- Utilisation des nombres flottants simple précision (32bits)
- Vérification de validité du trajet (point d'émergence sur la surface d'entrée, passage par le fond du sabot si présent, occlusion...)
- Trajets directs et indirects (rebond fond)

### Implémentation de référence

- Validée par rapport à CIVA 11
- Code C/C++ calculant en trois étapes successives
  - Permet d'analyser facilement les résultats pour chaque étape de calcul
    - Nécessite beaucoup de mémoire pour stocker les données temporaires
  - Multithreading via OpenMP
    - Utilise la librairie MKL pour les FFT
  - Jeu complet de configurations faisant varier les paramètres séparément :
    - $N_{pt\_champ}$ ,  $N_{pt\_capteur}$ ,  $N_{modes}$ ,  $N_{surfaces}$  et  $F_{echantillonnage}$
    - Tests de non-régression par rapport à cette référence pour les futures autres versions
    - MSVC2013 compilé en /fp:strict et optimisation maximale pour la vitesse d'exécution

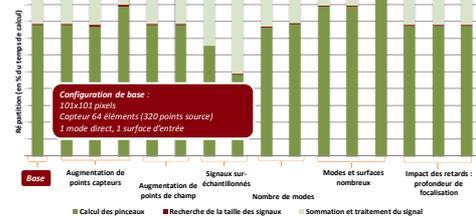
3 ÉTAPES DE CALCUL



## Analyse et vectorisation

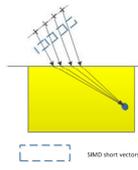
### Analyse de la répartition des traitements

- Tests réalisés sur une machine 2x12 cœurs @2.70 GHz (2x E5-2697v2)
- Mesures de performances sur l'implémentation de référence



### Vectorisation du Calcul des pinceaux

- Travail sur plusieurs pinceaux en simultané
- Même point de champ, plusieurs points capteur
- Même mode et surfaces traversées



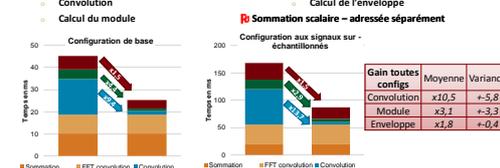
- Résolution du trajet par méthode de Newton
- Mutualisation des vérifications de traversée de surface
- Calcul des coefficients des pinceaux entièrement régulier et vectorisé

Gain sur toutes les configurations	Calcul des pinceaux
Moyenne	x4,1
Variance	0,2

- Bonne accélération du calcul du module, proche de l'optimal théorique
- vecteurs SSE4.2 - 128bits : 4 flottants 32bits par registre/instruction

### Vectorisation du Traitement du signal

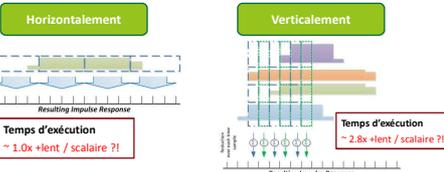
- Traitement du signal : vectorisation signal par signal



- Gains sur-linéaires de la convolution : calculs à bas coût SIMD (shuffle dans les registres) + calcul combiné de plusieurs valeurs du signal par donnée chargée
- Bonne accélération du calcul du module de l'ordre de l'optimal théorique (vecteurs SSE4.2 - 128bits : 4 flottants par registre/instruction)
- Accélération limitée du calcul de l'enveloppe (utilisation des FFT MKL déjà optimisées)

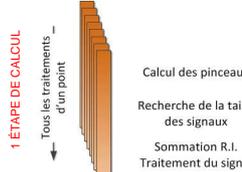
## Optimisations

### Sommation sur les Réponses Impulsionnelles - 2 approches



- Calculs vectorisés moins performants que le calcul scalaire
- Nombreux traitements pour transformer les données en registres SIMD (calculs non réguliers, bornes variables selon les pinceaux...)
- Algorithmie peu adaptée aux contraintes du calcul SIMD (faible régularité...)
- Analyse en vue d'amélioration à l'étude (pré traitement, tri des données...)
- Sur GPU, approche SIMD obligatoire : problème de synchronisation de l'algorithme de base (proche de l'horizontal) ; espérance de gain avec l'algorithme vertical (absence de synchro.)

### Calcul de champ par point en une étape



- Regroupement des traitements par point pour la parallélisation multithread
- 1 thread calcule le champ depuis les pinceaux jusqu'à l'amplitude finale en 1 point
- Réduit le besoin mémoire pour des données temporaires (jetées à la volée)
- Augmente les opportunités de réutilisation des caches
- Augmente le gain du parallélisme (+ de traitements par thread)

### Synthèse des résultats - SIMD SSE 4.2

Algo de référence	Config Base		Gain SIMD	Moyenne		Gain SIMD
	Scalaire	SIMD		Scalaire	SIMD	
Calcul des pinceaux	136,7 ms	31,8 ms	x4,3	434,7 ms	106,3 ms	x4,1
Taille Signaux	2,0 ms	2,0 ms	x1,0	5,7 ms	5,5 ms	x1,0
Somme + Trait. du sig.	46,0 ms	29,5 ms	x1,6	128,7 ms	70,7 ms	x1,8
Total algo référence	184,7 ms	63,3 ms	x2,9	569,1 ms	182,5 ms	x3,1
Algo. en une étape	162,5 ms	48,9 ms	x3,3	525,3 ms	161,9 ms	x3,2
	x1,1	x1,3	x3,7	x1,1	x1,1	x3,5

Machine 2x12 cœurs Architecture Ivy Bridge	Mise à l'échelle		Algo. Scalaire ref.	Algo. SIMD 1 étape
	Moyenne	Variance		
	x19,6	+0,3		x18,4
	19,6/24 = 81,5%			18,4/24 = 76,6%

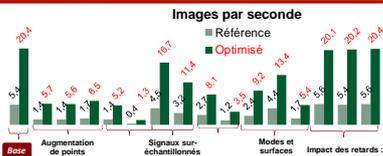
  

Machine 2x8 cœurs Architecture Ivy Bridge	Moyenne		Algo. Scalaire ref.	Algo. SIMD 1 étape
	Moyenne	Variance		
	x14,1	+0,1		x13,5
	14,1/16 = 87,9%			16/13,5 = 84,5%

## Conclusions et Perspectives

### Conclusions

- Obtention de bonnes accélérations par la vectorisation des codes de calcul des pinceaux et de traitement du signal
- L'étape de sommation des pinceaux sur les RI ne bénéficie pas d'accélération satisfaisantes. Etude en cours pour en déterminer l'origine
- Mise à l'échelle tirant partie des cœurs de calculs disponibles sur les processeurs récents
- Jusqu'à 20 images par seconde sur la configuration de base
- L'objectif de calcul interactif est atteint sur CPU !



### Perspectives

- Vectorisation utilisant les instructions AVX (jeu d'instruction 256bits - 8 flottants/registre)
- Utilisation de cartes Xeon Phi - bonnes perspectives de passage à l'échelle manycore
- Calcul d'écho sur CPU profitant des optimisations de calcul de champ présentées
- Codes d'écho et de champ sur architectures GPU
- Bibliographie
  - N. Gengembre, "Pencil method for ultrasonic beam computation", World Congress on Ultrasonics 2003.
  - J. Lambert, L. Lacassagne, S. Le Berre, G. Rougeron, and S. Chatillon, "High performance simulation of ultrasonic fields for Non Destructive Testing", SNA-MC 2013.
  - D. Romero-Laorden, O. Martinez-Graullera; C. J. Martn; M. Pérez and L. G. Ullate "Field modelling acceleration on ultrasonic systems using graphic hardware Computer Physics Communications", 2011