

micro et nanoélectronique
microsystèmes
intelligence ambiante
biologie et santé chaîne de l'image



2009

Micro systèmes enfouis pour le contrôle de structures de génie civil : traitement des signaux issus du réseau dense

M. Carmona

Directeur de thèse : O. Michel

Encadrants : B. Nicolas, N. Sprynski

Conseiller scientifique : J-L. Lacoume

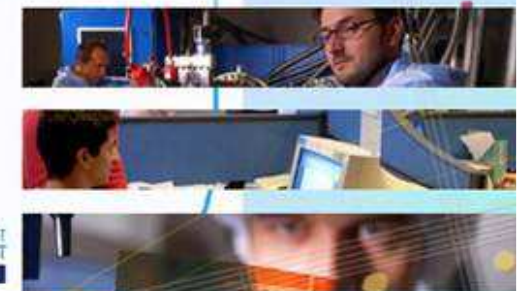
Chef du laboratoire FAOM : A. Robinet



leti



cea



Plan

- 1. Cadre et objectifs de la thèse.**
- 2. Localisation, orientation et diagnostic géométrique.**
- 3. Tomographie passive 3D-3D : théorie.**
- 4. Tomographie passive 3D-3D : expérimentations.**
- 5. Conclusion et perspectives.**

Plan

1. **Cadre et objectifs de la thèse.**
2. **Localisation, orientation et diagnostic géométrique.**
3. **Tomographie passive 3D-3D : théorie.**
4. **Tomographie passive 3D-3D : expérimentations.**
5. **Conclusion et perspectives.**

1. Cadre et objectifs de la thèse.

1.1. Présentation du projet global.

- **Domaine** : Surveillance de l'état de santé d'un matériau/ouvrage d'art (ponts, barrages, bâtiments, etc.) (SHM).
- **Technologie** : Instrumentation en volume par un réseau de micro-systèmes (capteur(s) + mémoire + émetteur + packaging + etc.).
- **Contraintes** : Utiliser les sources d'énergie ambiantes (vent, pluie, trafic routier, activité humaine, etc.).

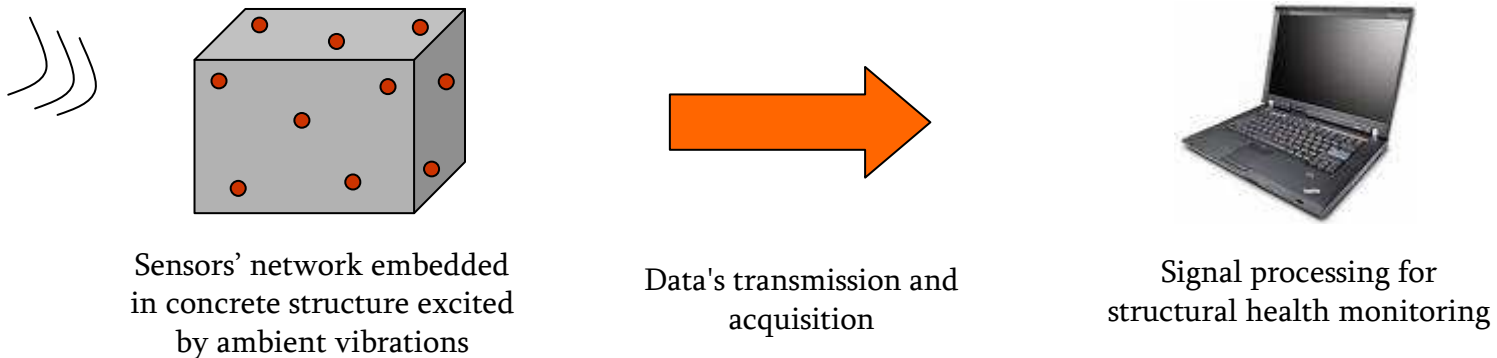
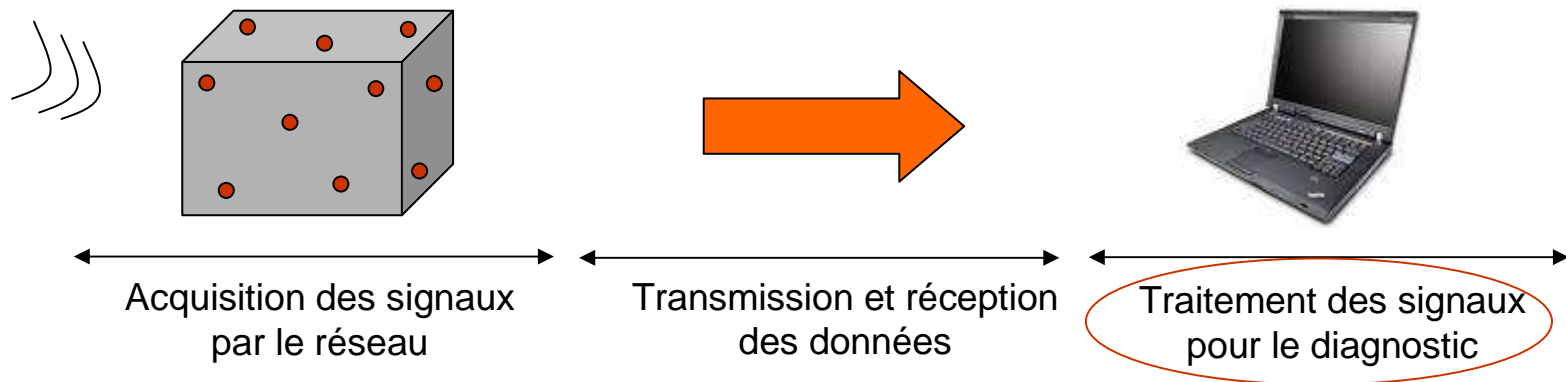


Figure. Global view of the project.

1. Cadre et objectifs de la thèse.

1.2. Cadre et contexte de la thèse.

- **Etat de l'art** : SHM passive à partir d'une instrumentation en surface ([Farrar99], [Cremona04]).
- **Intérêt d'une instrumentation en volume** : Détection, localisation et identification de défauts (fissure, augmentation de la porosité, érosion, etc.).
- **Hypothèse** : Instrumentation en volume "maîtrisée".

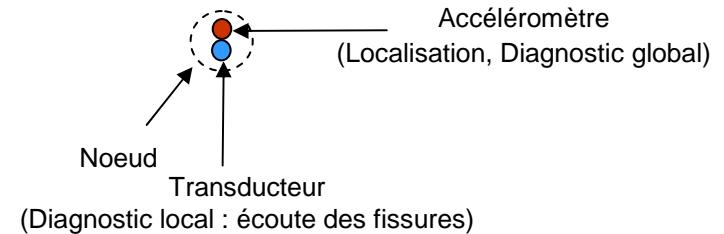


1. Cadre et objectifs de la thèse.

1.3. Objectifs de la thèse.

➤ Localiser et orienter le réseau.

- Interprétation des mesures.
- Accès à des informations locales (pH, température, microfissures, etc.).

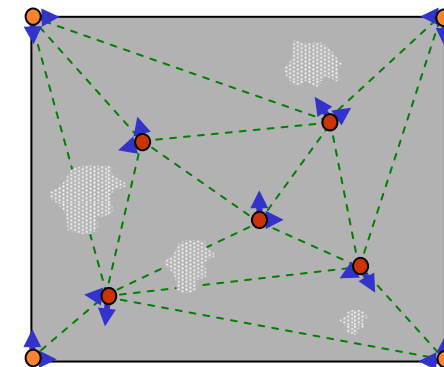


➤ Etablir une carte des vitesses de propagation des ondes de volume.

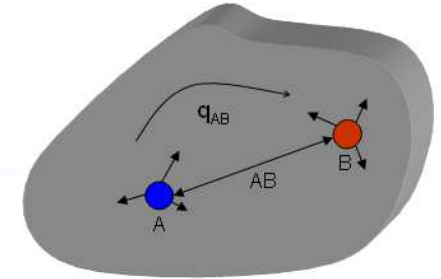
- Paramètres significatifs de l'état de santé de la structure.

➤ Définir une instrumentation adaptée au diagnostic.

- Validation des méthodes théoriques.
- Preuve de la réalisabilité des méthodes.



1. Cadre et objectifs de la thèse.

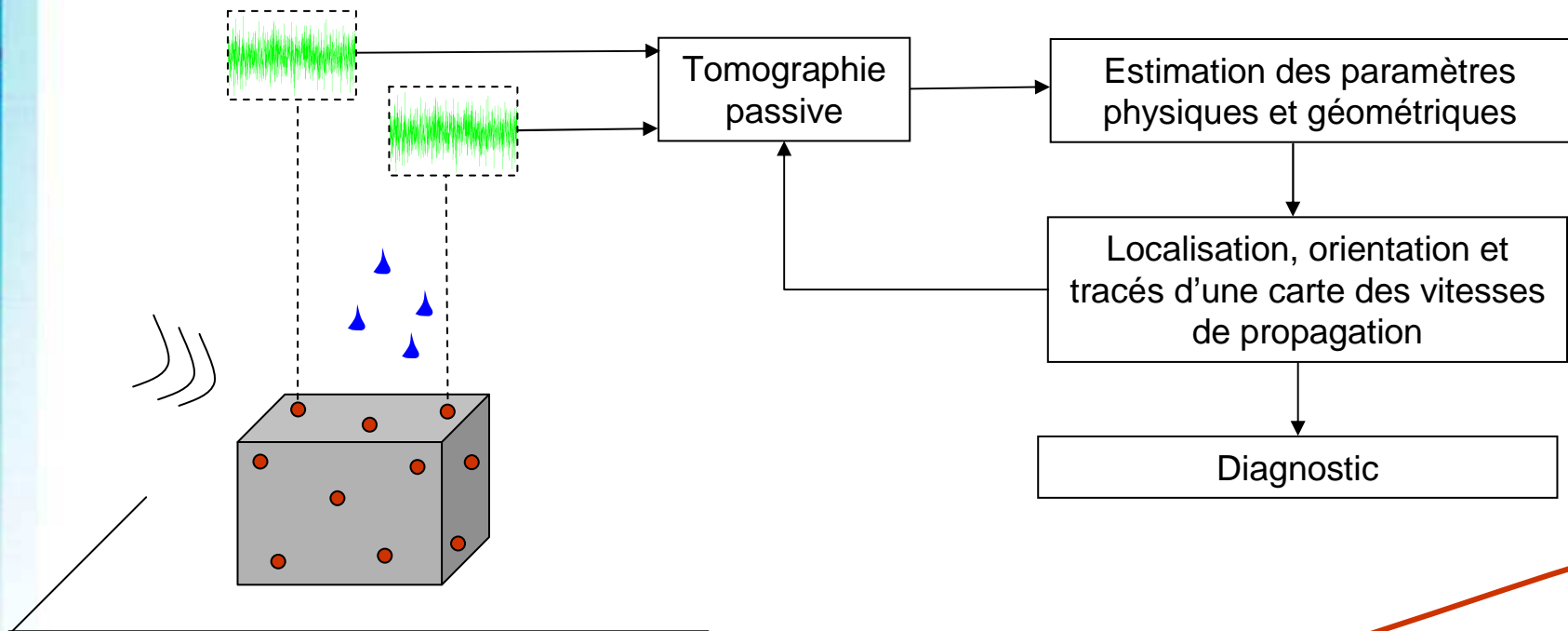


1.4. Stratégie.

- **Tomographie passive** : reconstruire passivement la réponse impulsionnelle du milieu entre deux capteurs (**fonction de Green**).
- **Estimation de paramètres à partir de la fonction de Green reconstruite** :
 - Distance et orientation entre capteurs (**paramètres géométriques**).
 - Vitesses de propagation des ondes de volume (**paramètres physiques**).
- **Localisation et orientation** :
 - Reconstruire la position/orientation du réseau à partir d'un jeu de distances/orientations relatives.
- **Statistiques pour le diagnostic** :
 - Réitérer les processus d'estimation pour améliorer les estimations et établir un diagnostic.

1. Cadre et objectifs de la thèse.

1.5. Stratégie en image.



VALIDATIONS EXPERIMENTALES

Plan

1. Cadre et objectifs de la thèse.
2. **Localisation, orientation et diagnostic géométrique.**
3. Tomographie passive 3D-3D : théorie.
4. Tomographie passive 3D-3D : expérimentations.
5. Conclusion et perspectives.

2. Localisation, orientation et diagnostic géométrique.

2.1. Présentation du problème de localisation.

- **Cadre** : N capteurs dont la position de $k > 4$ sont connues et tels que quelques distances entre capteurs soient connues avec une certaine imprécision.
(obtenues par tomographie passive).
- **Problématique** : Dans quel mesure peut-on remonter à la position du réseau ?

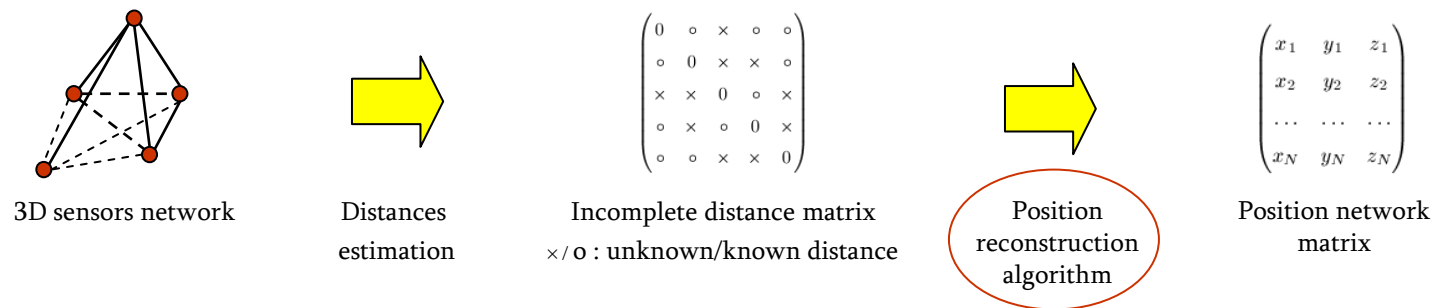


Fig. Network location process.

2. Localisation, orientation et diagnostic géométrique.

2.2. Présentation du problème d'orientation.

- **Cadre** : N capteurs dont la position de $k > 1$ sont connues et tels que quelques orientations relative entre capteurs soient connues avec une certaine imprécision (obtenues par tomographie passive).
- **Problématique** : Dans quel mesure peut-on remonter à l'orientation du réseau ?

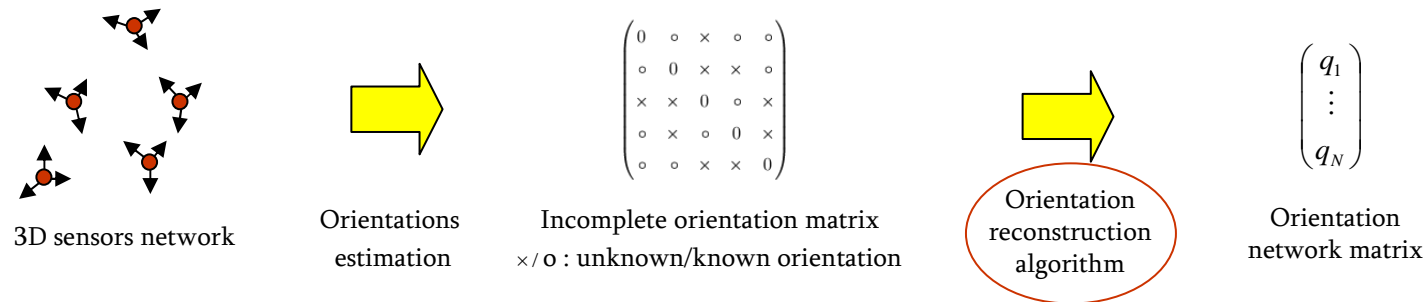


Fig. Network orientation process.

2. Localisation, orientation et diagnostic géométrique.

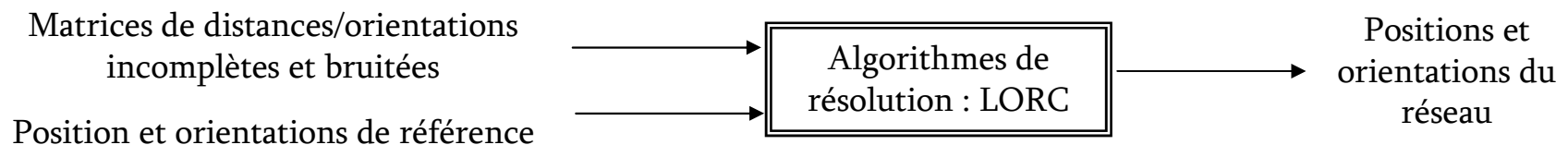
2.3. Résolution des deux problèmes.

➤ Etat de l'art :

- Résolution du problème de localisation dans des cas particuliers ([téléphonie mobile, tracking](#)).
- Problème d'orientation nouveau.

➤ Avancement :

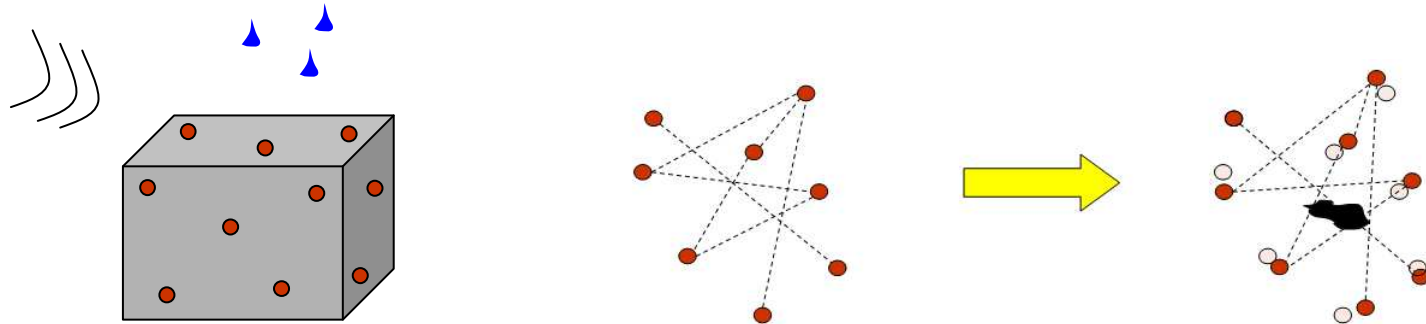
- Algorithmes de résolution des deux problèmes dans le cas général.
- Caractérisation sous Matlab ([temps de calcul, précision et robustesse](#)).
- Processus de brevetabilité en cours ([M. Carmona, O. Michel, "Procédé de localisation et d'orientation d'un réseau de capteurs"](#)).



2. Localisation, orientation et diagnostic géométrique.

2.4. Application au diagnostic géométrique.

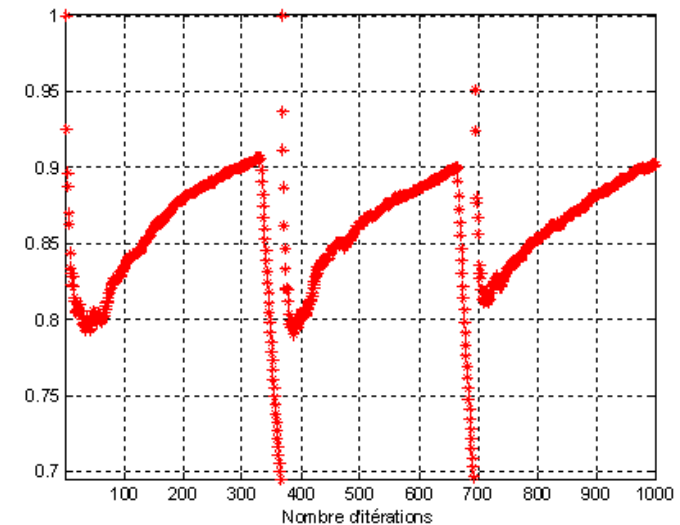
- **Problématique** : prendre compte les informations à chaque évènements.



- **Stratégie** : identifier un estimateur à mémoire et définir un critère de convergence de l'estimation.

- **Résultats** :

- Estimateur et critère identifiés.
- Caractérisation sous Matlab.



2. Localisation, orientation et diagnostic géométrique.

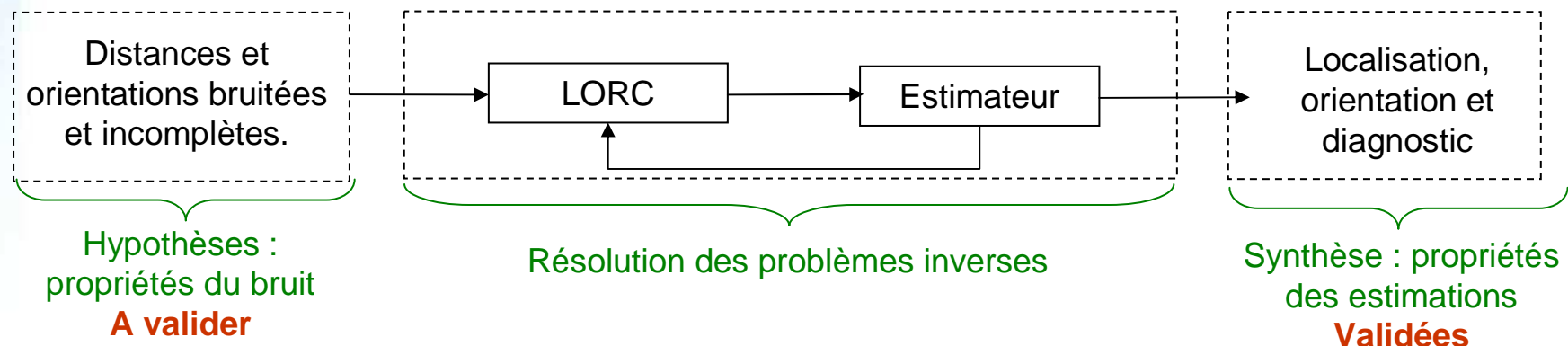
2.5. Conclusion sur la partie géométrique.

➤ Avancement :

- Résolution théorique des problèmes de localisation et d'orientation.
- Stratégie de prises en compte cumulative des informations développée.
- Validation des méthodes en simulation.

➤ Perspectives :

- Processus de brevetabilité et de publication en cours.
- Etudier des estimateurs plus sophistiqués ([filtrage de Kalman](#)).



Plan

1. **Cadre et objectifs de la thèse.**
2. **Localisation, orientation et diagnostic géométrique.**
3. **Tomographie passive 3D-3D : théorie.**
4. **Tomographie passive 3D-3D : expérimentations.**
5. **Conclusion et perspectives.**

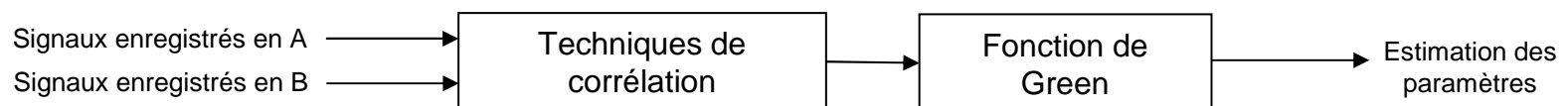
3. Tomographie passive 3D- 3D : théorie.

3.1. Objectifs et stratégie.

- **Objectifs** : estimer les paramètres : distances, orientations relatives et vitesses de propagation des ondes P et S.
- **Stratégie** :
 - Reconstruire la fonction de Green du milieu entre deux capteurs à partir de techniques de corrélation de sollicitations ambiantes.



- Extraire les paramètres de la fonction de Green reconstruite sous l'hypothèse du modèle : $G_c = G_{ho} + G_{he}$ et $G_{ho} \gg G_{he}$



3. Tomographie passive 3D- 3D : théorie.

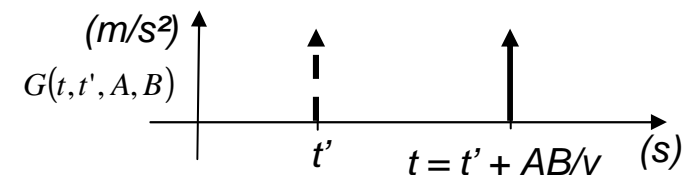
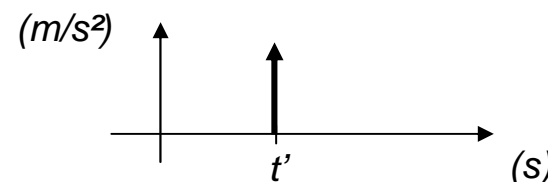
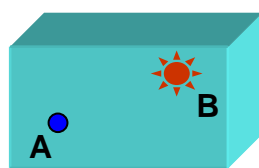
3.2. Etat de l'art non exhaustif et problématique.

➤ **Tomographie passive 1D-1D à 3D-3D :**

- Théorème de fluctuation-dissipation
- R. Weaver & O. Lobkis (acoustique)
- M. Campillo (sismique) - Thèses LGIT (E. Larose, L. Sthely, P. Gouédard, etc.)
- Y. Colin de Verdière (théorie des opérateurs linéaires)

➤ **Regard sur le cas scalaire :**

- Dérivée temporelle de la corrélation proportionnelle à la fonction de Green.
- La fonction de Green est impulsion retardée de $t = AB/v$.
- On obtient une information sur AB et v .



3. Tomographie passive 3D- 3D : théorie.

➤ **Problématique :**

- Etablir une relation entre fonction de Green et de corrélation pour l'équation de propagation des ondes dans les solides.
- Vérifier expérimentalement cette relation.
- Définir une instrumentation adaptée à l'établissement expérimentale de cette relation.

3. Tomographie passive 3D- 3D : théorie.

3.3. Fonction de Green dans un milieu sans dissipation.

➤ **Expression :**
$$G(x, t) = \frac{\delta(t - t_P)}{4\pi v_P^2 \|x\|} \tilde{x} \tilde{x}^T - \frac{\delta(t - t_S)}{4\pi v_S^2 \|x\|} (\tilde{x} \tilde{x}^T - \mathbf{I}_3) + \frac{t \Pi_{[t_P; t_S]}(t)}{4\pi \|x\|^3} (3\tilde{x} \tilde{x}^T - \mathbf{I}_3)$$

Champ proche :

$$G(x, t) \approx \frac{t \Pi_{[t_P; t_S]}(t)}{4\pi \|x\|^3} (3\tilde{x} \tilde{x}^T - \mathbf{I}_3)$$

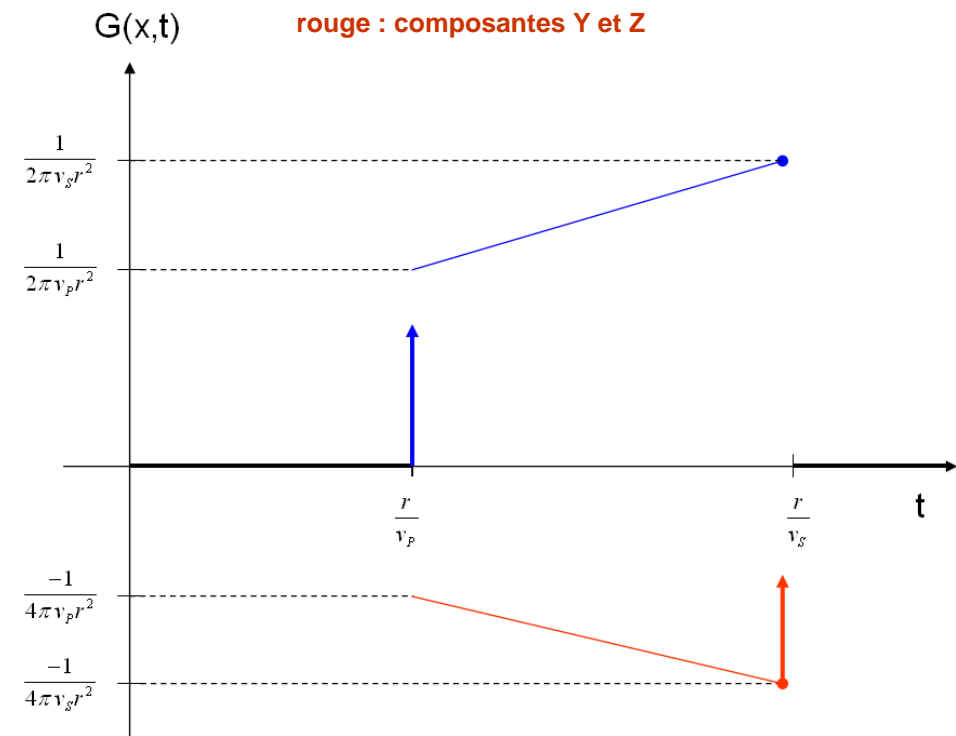
Champ lointain :

$$G(x, t) \approx \frac{\delta(t - t_P)}{4\pi v_P^2 \|x\|} \tilde{x} \tilde{x}^T - \frac{\delta(t - t_S)}{4\pi v_S^2 \|x\|} (\tilde{x} \tilde{x}^T - \mathbf{I}_3)$$

Fonction de Green au point (r,0,0)

bleu : composante X

rouge : composantes Y et Z



3. Tomographie passive 3D- 3D : théorie.

3.4. Equation de propagation des ondes dans les solides.

➤ **Hypothèses et terminologie :**

- X est un solide linéaire élastique, homogène et isotrope.
- ρ : densité volumique de X (kg/m^3) ; (λ, μ) paramètres de Lamé de X (N/m^2)
- (χ, η) coefficients de viscosité en compression et cisaillement ($\text{N}/(\text{m}^2\text{s})$)
- u : champ de déplacement ; f : source d'excitation
- T : tenseur des contraintes ; S : tenseur des déformations

➤ **Lois mises en jeu :**

- Loi de Newton : $\rho \frac{\partial^2 \mathbf{u}}{\partial t^2} = \text{div } T + f$
- Loi de Hooke avec amortissement visqueux : $T = [c]S + [\nu] \frac{\partial S}{\partial t}$
- $S = \frac{1}{2}(\text{grad } (u) + \text{grad } (u)^T)$

3. Tomographie passive 3D- 3D : théorie.

- Equation de propagation des ondes dans les solides :

$$\left[\frac{\partial^2}{\partial t^2} I_3 + 2 \frac{\partial}{\partial t} D + L \right] a = f$$

a : accélération ; f : source

$$L = -\frac{\lambda + \mu}{\rho} \nabla \nabla^T - \frac{\mu}{\rho} \Delta I_3 \quad : \text{Opérateur de propagation}$$

$$D = -\frac{1}{2} \frac{\chi + \eta}{\rho} \nabla \nabla^T - \frac{1}{2} \frac{\eta}{\rho} \Delta I_3 \quad : \text{Opérateur d'amortissement}$$

$$\Delta = \sum_{i=1}^3 \frac{\partial^2}{\partial x_i^2} \quad : \text{Laplacien}$$

$$\nabla = \left(\frac{\partial}{\partial x} \quad \frac{\partial}{\partial y} \quad \frac{\partial}{\partial z} \right)^T \quad : \text{Gradient}$$

3. Tomographie passive 3D- 3D : théorie.

- Mise sous forme d'un problème de Cauchy abstrait inhomogène :

$$(S) : \begin{cases} \frac{\partial}{\partial t} \hat{\mathbf{a}} = \begin{pmatrix} -\mathcal{D} & \mathcal{I}_3 \\ \mathcal{D}^2 - \mathcal{L} & -\mathcal{D} \end{pmatrix} \hat{\mathbf{a}} + \hat{\mathbf{f}} \\ \forall x \in X, \hat{\mathbf{a}}(x, 0) = 0 \end{cases} \quad \text{avec} \quad \hat{\mathbf{a}} := \begin{pmatrix} \mathbf{a} \\ \frac{\partial}{\partial t} \mathbf{a} + \mathcal{D}\mathbf{a} \end{pmatrix} ; \hat{\mathbf{f}} := \begin{pmatrix} 0_{3,1} \\ \mathbf{f} \end{pmatrix}$$

- Propriétés de l'opérateur : $\mathcal{K} := \begin{pmatrix} -\mathcal{D} & \mathcal{I}_3 \\ \mathcal{D}^2 - \mathcal{L} & -\mathcal{D} \end{pmatrix}$

- Opérateur différentiel ou pseudo-différentiel si défini à partir de son symbole.
- Génère un semi-groupe fortement continu si a de bonnes propriétés

spectrales :

$$\max_{\gamma(\xi) \in \text{Sp}(\sigma_{\mathcal{A}}(\xi))} \Re(\gamma(\xi)) \leq \omega$$

- Solution : $\forall (x, t) \in X \times \mathbb{R}^+, \hat{\mathbf{a}}(x, t) = \int_{\mathbb{R}^+} \Omega(s) \hat{\mathbf{f}}(x, t - s) ds$

où $(\Omega(t))_{t \geq 0} := (\exp(t\mathcal{K}))_{t \geq 0}$

3. Tomographie passive 3D- 3D : théorie.

- **Expression de la fonction de Green :**

$$\mathfrak{G}(t, x, y) = H(t) \left[\left[e^{-t\mathcal{D}} \frac{\sin(tQ)}{Q} \right] \right] (x, y)$$

Avec H la fonction d'Heaviside et $Q := \sqrt{\mathcal{D}^2 - \mathcal{L}}$. Sous l'hypothèse $\mathcal{L}\mathcal{D}a = \mathcal{D}\mathcal{L}a$.

- **Définition de la fonction de Corrélation :**

$$\mathfrak{C}_{ij}(\tau, x, y) := \lim_{T \rightarrow \infty} \frac{1}{T} \int_0^T \mathbf{a}_i(t, x) \mathbf{a}_j(t + \tau, y) dt$$

- **Hypothèse de bruit blanc « complet » de densité spectrale σ^2 :**

$$\begin{aligned} \lim_{T \rightarrow \infty} \frac{1}{T} \int_0^T \mathbf{f}_k(t - s, z) \mathbf{f}_{k'}(t + \tau - s', z') dt &= \mathbb{E} [\mathbf{f}_k(t - s, z) \mathbf{f}_{k'}(t + \tau - s', z')] \\ &= \sigma^2 \delta(\tau + s - s') \delta(z - z') \delta(k - k') \end{aligned}$$

3. Tomographie passive 3D- 3D : théorie.

- Expression de la fonction de Corrélation (bruit blanc + fonction de Green) :

$$\frac{\partial \mathfrak{C}(\tau, x, y)}{\partial \tau} = -\frac{\sigma^2}{4} \left[\left[e^{-|\tau|D} \frac{\sin(\tau Q)}{QD} \right] \right] (x, y)$$

- Relation avec la fonction de Green : $\mathfrak{G}(t, x, y) = H(t) \left[\left[e^{-tD} \frac{\sin(tQ)}{Q} \right] \right] (x, y)$

$$\frac{\partial \mathfrak{C}(\tau, x, y)}{\partial \tau} = -\frac{\sigma^2}{4} \int_X [[\mathcal{D}^{-1}]] (x, z) \text{Imp } \mathfrak{G}(\tau, z, y) dz$$

avec : $\text{Imp } \mathfrak{G}(\tau, z, y) = \mathfrak{G}(\tau, z, y) - \mathfrak{G}(-\tau, z, y)$

3. Tomographie passive 3D- 3D : théorie.

3.5. Discussion autour des hypothèses et du cas scalaire.

➤ **Analogie entre le cas scalaire et vectoriel**

- **Cas scalaire :** $\left[\frac{\partial^2}{\partial t^2} + 2\varepsilon \frac{\partial}{\partial t} + \Delta \right] a = f$

$$\frac{\partial C(\tau, x, y)}{\partial \tau} = -\frac{\sigma^2}{4\varepsilon} \text{Imp } G(x, y, \tau) = -\frac{\sigma^2}{4} \int_X \varepsilon^{-1} \delta(z, y) \text{Imp } G(x, z, \tau) dz$$

- **Cas vectoriel :** $\left[\frac{\partial^2}{\partial t^2} I_3 + 2 \frac{\partial}{\partial t} D + L \right] a = f$

$$\frac{\partial \mathcal{C}(\tau, x, y)}{\partial \tau} = -\frac{\sigma^2}{4} \int_X [[D^{-1}]](x, z) \text{Imp } \mathfrak{G}(\tau, z, y) dz$$

➤ **Dissipation :**

- Rôle fondamental de la dissipation dans la tomographie passive.
- Interprétation physique du noyau de l'inverse de la dissipation difficile.

3. Tomographie passive 3D- 3D : théorie.

- **Hypothèse bruit blanc en pratique :**
 - Etat de l'art : intégration de bruit ambiant.
 - A valider en expérimentation.

- **Hypothèses de commutativité des opérateurs L et D :**
 - Cas du domaine X infini : pas de problème.
 - Cas d'un domaine X borné : problème de conditions aux bords, domaine de définition de l'accélération (distribution ?), décomposition spectrale, etc.

3. Tomographie passive 3D- 3D : théorie.

3.6. Fonction de Green dans un milieu avec dissipation.

- Expression dans la plan fréquence spatio-temporelle :

$$\forall (\xi, \omega) \in \mathbb{R}^3 \times \mathbb{R}, \hat{G}(\xi, \omega) = \frac{1}{\omega^2 - v_S^2(\omega) \|\xi\|^2} (\mathbf{I}_3 - \omega^{-2} v_S^2(\omega) \xi^T \xi) + \frac{\omega^{-2} v_P^2(\omega)}{\omega^2 - v_P^2(\omega) \|\xi\|^2} \xi \xi^T$$

avec : $v_P^2(\omega) = \frac{\lambda + 2\mu}{\rho} + i\omega \frac{\chi + 2\eta}{\rho} = v_P^{*2} + i\omega \alpha_P^{*2}$ et $v_S^2(\omega) = \frac{\mu}{\rho} + i\omega \frac{\eta}{\rho} = v_S^{*2} + i\omega \alpha_S^{*2}$

- Expression dans le plan spatial – fréquence temporelle :

$$\hat{G}(x, \omega) = \frac{e^{-i\omega v_S^{-1}(\omega) \|x\|}}{4\pi v_S^2(\omega) \|x\|} \left[(\mathbf{I}_3 - \tilde{x} \tilde{x}^T) + \left(-\frac{i\omega^{-1} v_S(\omega)}{\|x\|} + \frac{\omega^{-2} v_S^2(\omega)}{\|x\|^2} \right) (\mathbf{I}_3 - 3\tilde{x} \tilde{x}^T) \right] \\ + \frac{e^{-i\omega v_P^{-1}(\omega) \|x\|}}{4\pi v_P^2(\omega) \|x\|} \left[\tilde{x} \tilde{x}^T + \left(\frac{i\omega^{-1} v_P(\omega)}{\|x\|} - \frac{\omega^{-2} v_P^2(\omega)}{\|x\|^2} \right) (\mathbf{I}_3 - 3\tilde{x} \tilde{x}^T) \right]$$

3. Tomographie passive 3D- 3D : théorie.

3.7. Conclusion sur la partie théorique.

➤ **Avancement :**

- Relation entre fonction de corrélation et de Green pour l'opérateur d'ondes élastiques établies.
- Article rédigé pour un milieu infini.

➤ **Perspectives :**

- Résoudre ou documenter les hypothèses discutées autour de la relation.
- Adapter le résultat à un domaine borné ([condition aux limites](#)).
- Soumettre un ou deux articles.

Plan

1. Cadre et objectifs de la thèse.
2. Localisation, orientation et diagnostic géométrique.
3. Tomographie passive 3D-3D : théorie.
4. **Tomographie passive 3D-3D : expérimentations.**
5. Conclusion et perspectives.

4. Tomographie passive 3D-3D : expérimentations.

4.1. Objectifs et stratégie.

➤ Objectifs :

- Valider expérimentalement les méthodes développées.
- Définir une instrumentation adaptée pour le diagnostic.

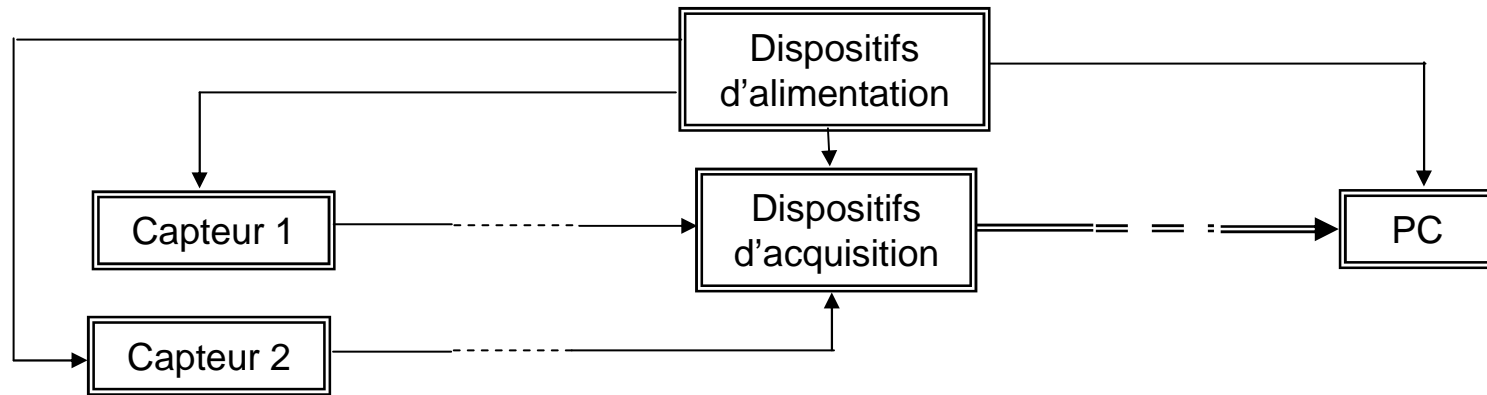
➤ Stratégie :

- Valider les méthodes pour un réseau en surface et une instrumentation "de qualité".
- Etudier la possibilité d'enfouir des éléments de mesure dans un matériau (béton, glace).
- Valider les méthodes avec un réseau enfoui dans du béton.

4. Tomographie passive 3D-3D : expérimentations.

4.2. Chaîne de mesures et bruits.

➤ Schématisation :



➤ Description :

- Capteurs (mesures, sensibilité, bruit propre, bande passante, etc.).
- Acquisition (fréquence d'échantillonnage, résolution, bruit propre, etc.).
- Alimentation (tension, impédance, bruit propre, etc.).
- Câblage (vitesse de transmission, capacité, bruit propre, etc.).
- PC (puissance de calcul, précision, mémoire, algorithmes, etc.).

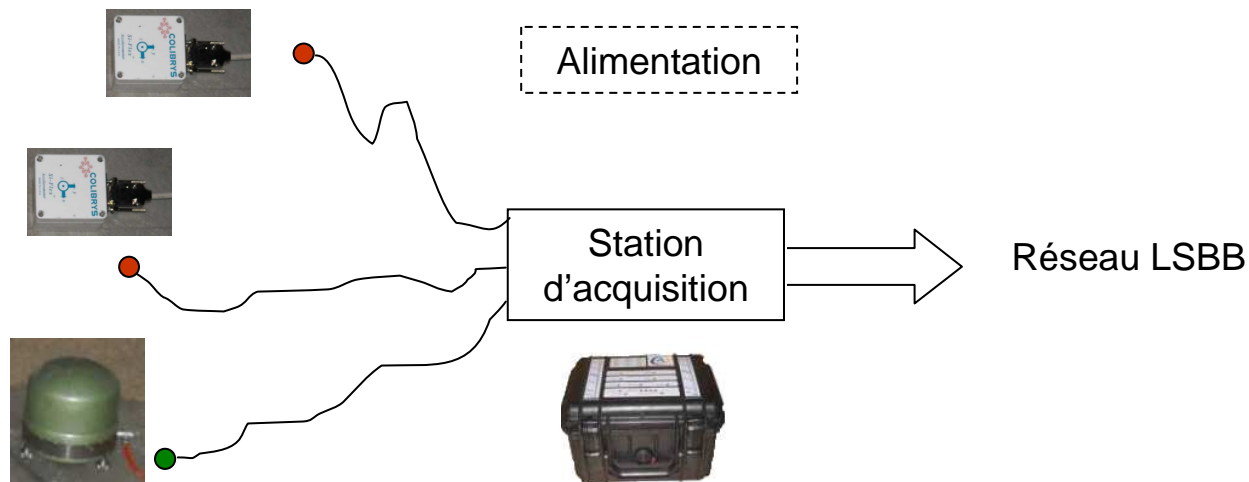
4. Tomographie passive 3D-3D : expérimentations.

4.3. Expérimentations mise en œuvre.

- Expérimentations au Laboratoire Souterrain à Bas Bruit et au GIPSA :



- Configuration du réseau de capteurs :

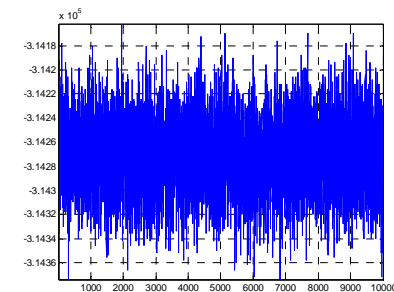


4. Tomographie passive 3D-3D : expérimentations.

4.4. Exploitations des mesures.

➤ **Distinguer le bruit ambiant des bruits de la chaîne de mesure :**

- Amplitude, Moyenne quadratique.
- Densité spectrale de puissance.
- Variance d'Allan.

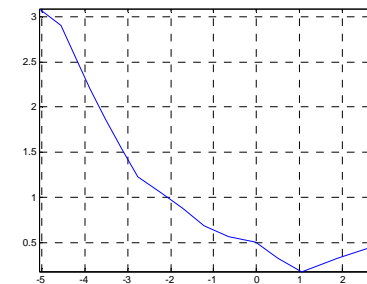


Signal LSBB

➤ **Problèmes identifiés :**

- Bruit alimentation et/ou numériseur trop fort(s).
- Couplage capteur/sol à refaire.

→ Prévoir de nouvelles expérimentations.



Allan deviation

4. Tomographie passive 3D- 3D : expérimentations.

4.5. Conclusion sur la partie théorique.

➤ **Avancement :**

- Réalisation et mise en œuvre de la chaîne de mesure.
- Exploitation des données en cours.

➤ **Perspectives :**

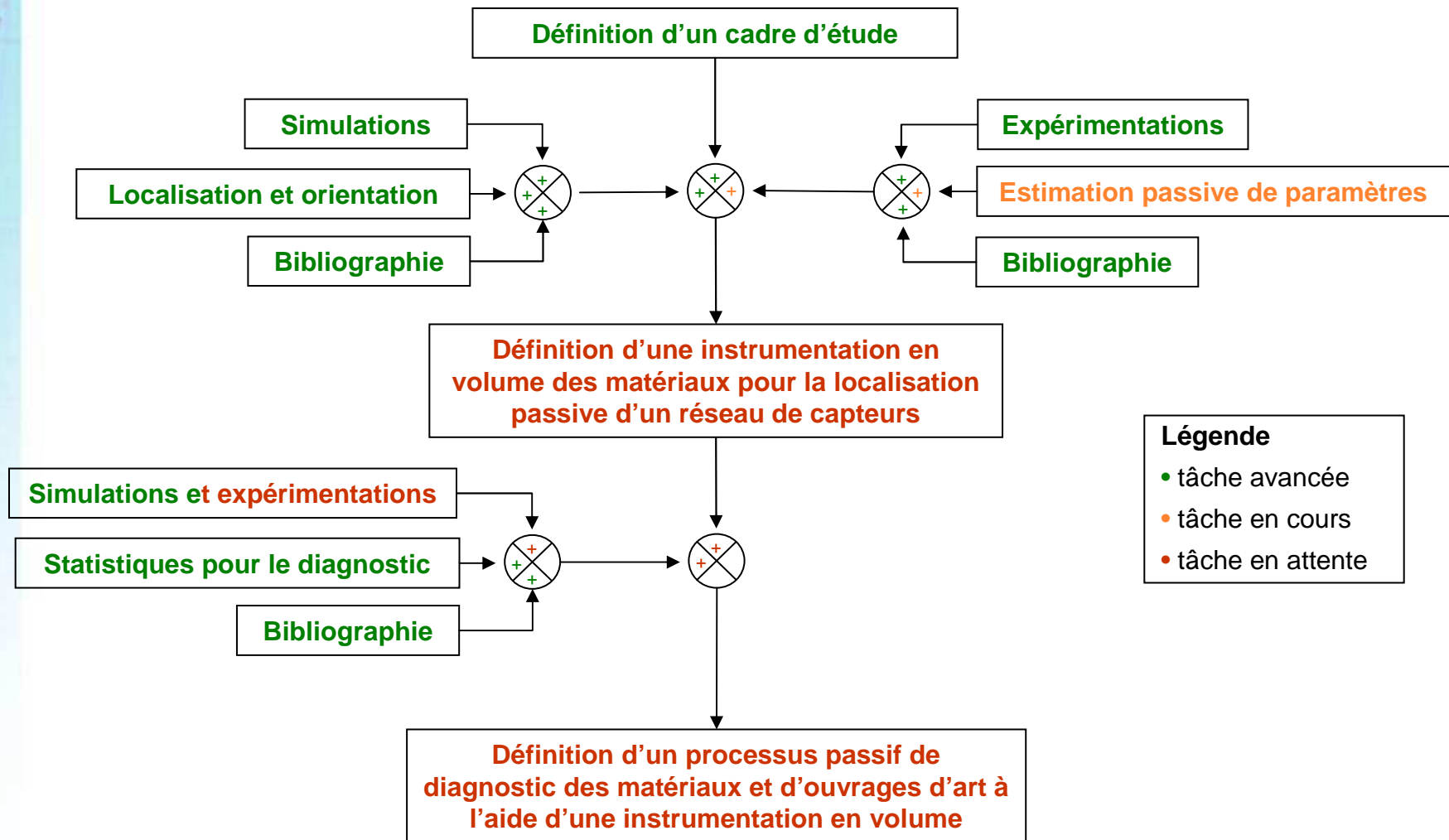
- Continuer les exploitations de mesures pour faire « surgir » la fonction de Green théorique.
- Renouveler une campagne de mesures.
- Enfouir un réseau pour valider le processus global de SHM.

Plan

1. **Cadre et objectifs de la thèse.**
2. **Localisation, orientation et diagnostic géométrique.**
3. **Tomographie passive 3D-3D : théorie.**
4. **Tomographie passive 3D-3D : expérimentations.**
5. **Conclusion et perspectives.**

5. Conclusion et perspectives.

➤ Avancement.



micro et nanoélectronique
microsystèmes
intelligence ambiante
biologie et santé chaîne de l'image



2009

**Fin de la présentation.
Merci pour votre attention.**

