

THÉORIE DES POSSIBILITÉS APPLIQUÉE À L'END DU BÉTON

POSSIBILITY THEORY APPLIED TO NDE OF CONCRETE

PLOIX M.A., GARNIER V., MOYSAN J.

LCND, IUT Aix-en-Provence, Avenue Gaston Berger, 13625 Aix-en-Provence Cedex

Résumé

Nous présentons une nouvelle application de fusion de données dans le cadre du projet ANR SENSO. L'objectif est d'améliorer l'évaluation de différents paramètres ou pathologies de structures de béton, en combinant des mesures effectuées par cinq différentes techniques de CND.

Chaque technique fournit une estimation des indicateurs recherchés, avec une certaine confiance selon sa fiabilité et sa sensibilité à chaque paramètre. Dans le cas d'estimations convergentes, la fusion améliore la confiance finale. Dans le cas d'estimations en désaccord, le conflit peut être géré par des opérateurs spécifiques.

Une solution est développée en s'appuyant sur la théorie des possibilités, très utilisée dans le cas de données imprécises et incertaines. Elle permet une grande liberté en terme de modélisation des connaissances et d'opérateur de combinaison, mais nécessite de faire les bons choix à chaque étape du processus de fusion.

Les résultats obtenus à partir de quelques observables sont présentés dans le cas de l'évaluation simultanée du taux de porosité et de la saturation en eau. Ils montrent que le choix d'un opérateur adaptatif fonction de la fiabilité est bien approprié au problème.

Abstract

A new application of data fusion is presented within the context of national research project named SENSO. The aim is to improve evaluation of parameters or pathologies of concrete structures by combining measurements from five different NDT.

Every technique is likely to provide an estimation of the unknown indicators with a certain confidence function of its reliability and its sensitivity to each parameter. When the estimations converge data fusion improves final confidence. In case of disagreement conflict can be managed by specific operators.

We develop an adapted solution based on possibility theory that is particularly used in case of imprecise and uncertain data. This theory is very flexible in term of data representations and fusion operators and then requires adapted choices at every step of fusion process.

Results are presented for simultaneous evaluation of water content and porosity ratio. They show that the chosen adaptative operator function of reliability is appropriate to the problem.

INTRODUCTION

L'objectif général du projet ANR SENSO (Stratégie d'Évaluation Non destructive pour la Surveillance des Ouvrages en béton) consiste à définir des protocoles de mesures non destructives d'indicateurs de durabilité des bétons in situ, basés sur la combinaison de techniques d'évaluation non destructive. Les indicateurs d'intérêt sont : le taux de porosité, la saturation en eau, la teneur en chlorures, la profondeur de carbonatation, la résistance mécanique et le module d'élasticité. Les techniques d'évaluation non destructive mises en oeuvre sont : le radar, la résistivité et la capacité électriques, la thermographie infrarouge et les ultrasons. De toutes ces techniques ont été extraits 74 observables (amplitudes, vitesses...).

Nous présentons ici l'étude d'une stratégie de fusion de données qui consiste à réunir toutes les informations recueillies pour en extraire la réponse la plus plausible. La fusion est donc une aide au diagnostic et est utilisée dans un premier temps pour estimer deux indicateurs simultanément : le degré de saturation en eau et le taux de porosité. En effet, deux campagnes de mesures ont pour l'instant été réalisées : des dalles ont été élaborées avec des taux de porosité différents, et elles ont été conditionnées pour obtenir les valeurs théoriques de saturation en eau de 0% puis 100%. Les différentes campagnes de mesures vont permettre d'établir une grande base de données de CND vis-à-vis de différents états et pathologies du béton.

Le processus de fusion de données se décompose en trois grandes étapes détaillées par la suite : la modélisation des connaissances qui aboutit à la construction des distributions à fusionner, la combinaison de ces distributions qui fournit une distribution finale, et enfin la décision basée sur un critère bien choisi.

CADRE GENERAL : LA FUSION EN THEORIE DES POSSIBILITES

L'intérêt de la fusion par le biais de la théorie des possibilités est de pouvoir combiner des informations plus ou moins précises et fiables, de différentes origines, afin de fournir une information globale de meilleure qualité. Les données sont représentées sous forme numérique continue, en s'appuyant sur la théorie des ensembles flous. Cette théorie est donc mieux adaptée que les méthodes basées sur la classification (du type Dempster-Shafer), très utilisées dans le domaine du CND pour la fusion d'images par exemple [1,2].

Distributions de possibilités

La construction d'une distribution de possibilités permet de modéliser des informations imprécises [3,4] (par exemple, un expert fournira plus volontiers un intervalle censé contenir la valeur d'un paramètre plutôt qu'une valeur précise). La distribution de possibilités d'un paramètre x s'écrit classiquement π_x . $\pi_x(u)$ est alors une valeur comprise entre 0 et 1 désigne le degré de possibilité pour que $x=u$:

- $\pi_x(u) = 0$ signifie que $x=u$ est impossible,
- $\pi_x(u) = 1$ signifie que rien n'empêche x de valoir u ,
- il existe au moins une valeur u^* telle que $\pi_x(u^*) = 1$ (condition de normalisation).

Les valeurs de u pour lesquelles $0 < \pi_x(u) \leq 1$ forment l'ensemble flou des valeurs possibles de x .

Combinaison des distributions

Le principe général est de trouver les zones d'accord et de désaccord entre les sources, pour en extraire une ou des informations suffisamment fiables. Il n'existe pas d'unique combinaison satisfaisante pour tous les problèmes. Toute la difficulté dans le choix d'un opérateur consiste à chercher un bon compromis entre un résultat précis mais sûrement faux et un résultat certain mais trop imprécis.

Les deux opérateurs fondamentaux en théorie des possibilités sont [3,5,6] :

- le mode conjonctif (« et » logique), qui représente un comportement sévère (notion généralisée d'intersection d'ensembles). Dans cette catégorie se trouvent les normes triangulaires, ou t-normes,
- le mode disjonctif (« ou » logique), qui représente un comportement indulgent (notion généralisée d'union d'ensembles). Dans cette catégorie se trouvent les conormes triangulaires, ou t-conormes.

Le tableau 1 montre quelques exemples des t-normes et t-conormes les plus couramment utilisées, et la figure 1 montre un exemple de trois distributions à fusionner, et le résultat de la fusion en utilisant d'une part la t-norme et d'autre part la t-conorme de Zadeh.

nom	t-norme	t-conorme duale
Zadeh	$\min(\pi_1, \pi_2)$	$\max(\pi_1, \pi_2)$
Probabiliste	$\pi_1 \cdot \pi_2$	$\pi_1 + \pi_2 - \pi_1 \cdot \pi_2$
Lukasiewicz	$\max(0, \pi_1 + \pi_2 - 1)$	$\min(1, \pi_1 + \pi_2)$

Tableau 1 : Exemples de T-normes et t-conormes les plus courantes [7].

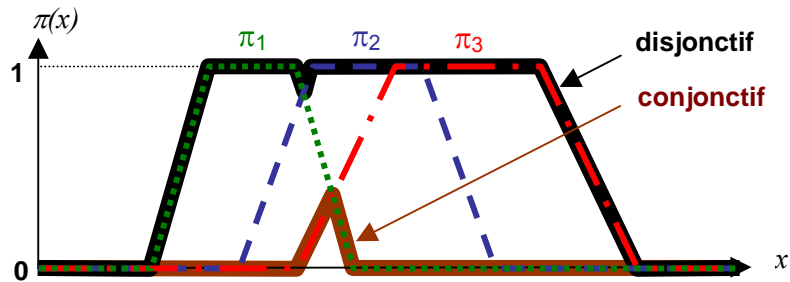


Figure 1 : T-norme et t-conorme de Zadeh combinant 3 distributions.

Tous les opérateurs se basent sur ces deux modes fondamentaux. La méthode à adopter dépend des propriétés qu'on souhaite lui voir satisfaire, du niveau de conflit entre les sources, et des fiabilités des sources lorsqu'elles sont connues. Certains opérateurs, plus élaborés, permettent d'avoir un comportement qui s'adapte automatiquement en fonction de la situation. Ce sont les opérateurs dits adaptatifs. Selon le degré de conflit et/ou les fiabilités, ils adoptent un comportement approprié : conjonctif, disjonctif, ou un compromis entre les deux.

Décision

Les deux critères les plus couramment utilisés sont :

- le critère de maximum : la solution retenue est celle pour laquelle la distribution fusionnée atteint son maximum de degré de possibilité,
- le critère de seuil, qui consiste à choisir un seuil de degré de possibilité, et les valeurs du paramètre pour lesquelles le degré de possibilité y est supérieur sont les solutions.

Le choix du critère dépend de ce que l'on attend : une solution unique ou une plage de solutions. L'étendue de la plage solution peut par ailleurs être considéré comme un indicateur de la précision et/ou de la fiabilité du résultat obtenu.

MODELISATION DES CONNAISSANCES

Les données nécessaires à la construction des distributions dans le cadre du projet SENSO sont : l'écart-type de mesure de chaque observable (issu du traitement statistique des campagnes de mesures), la corrélation entre chaque observable et les deux indicateurs recherchés, et la valeur de chaque observable choisi et mesuré sur la structure étudiée.

Construction des distributions de possibilités en terme d'observable

Dans le cas où l'information provient d'un capteur, la distribution de possibilités permet de généraliser la notion d'intervalle d'erreur. Nous avons testés plusieurs types de représentation de cette information (gaussienne, triangle et trapèze). Nous avons opté pour

la forme trapézoïdale (cf. exemple de la figure 2), car elle a l'avantage de s'annuler aux extrémités, ce qui permet d'exclure les valeurs trop éloignées, et le plateau à un degré de possibilité de 1 permet de ne pas privilégier une seule valeur, mais un ensemble de valeurs aussi possibles les unes que les autres. La construction du trapèze est basée sur la valeur mesurée de l'observable et son écart-type issu des campagnes de mesures.

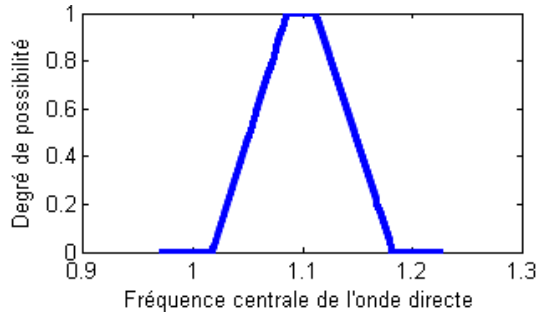


Figure 2 : Distribution de possibilité pour une fréquence radar mesurée de 1.1 GHz.

Construction des distributions de possibilités en terme d'indicateurs

Les solutions recherchées étant des valeurs du taux de porosité et du degré de saturation, les distributions de possibilités à fusionner doivent être exprimées en fonction de ces deux indicateurs. Pour cela, on applique le principe d'extension [5] à la distribution précédemment définie, en utilisant la corrélation (empirique, obtenue par régression bilinéaire issue des campagnes de mesures) entre l'observable et les deux indicateurs (cf. figure 3).

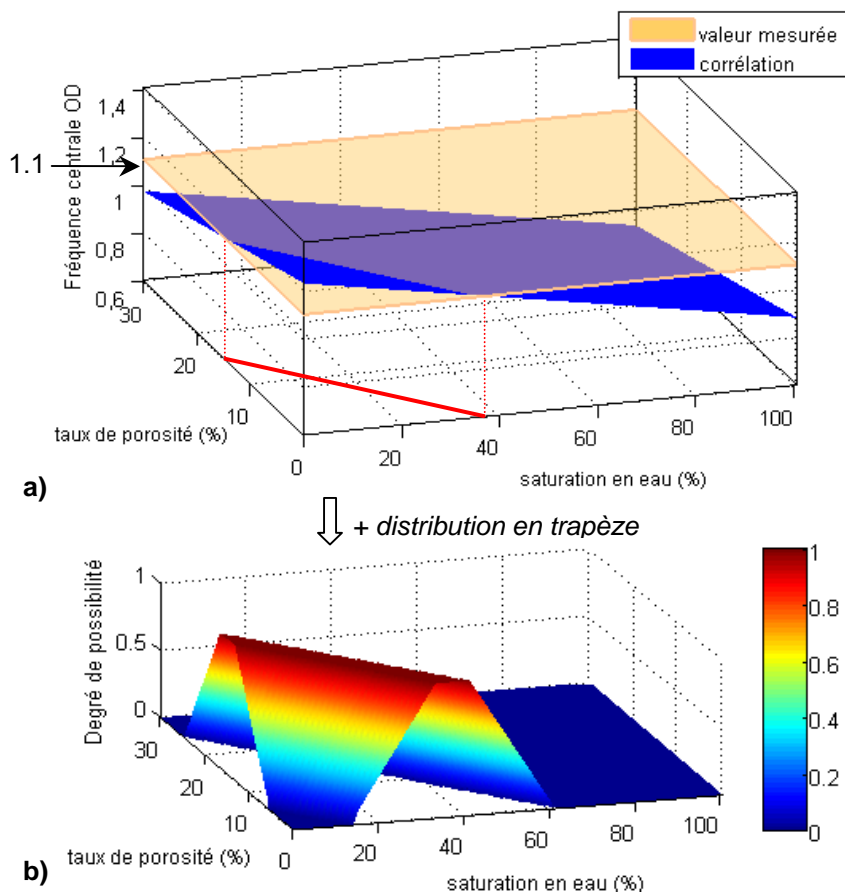


Figure 3 : a) Corrélation fréquence radar / {taux de porosité ; degré de saturation} (plan bleu), et b) distribution de possibilité en terme de taux de porosité et saturation en eau,

pour un exemple de fréquence radar mesurée de 1.1 GHz.

Chaque valeur mesurée d'un observable fournit donc une distribution de possibilités. La visualisation des distributions permet de rendre compte des valeurs de {taux de porosité ; degré de saturation} proposées par chaque mesure, et de la sensibilité des observables aux indicateurs.

La figure 4 montre quatre exemples de distributions. On peut remarquer que la vitesse des ondes ultrasonores de surface est très peu sensible à la saturation en eau puisqu'une mesure (de 2209 m/s ici) donne une distribution où toutes les valeurs de saturation sont possibles contrairement au taux de porosité. A l'inverse, la mesure capacitive est très peu sensible au taux de porosité. Par ailleurs, les deux autres observables présentés sont sensibles aux deux indicateurs.

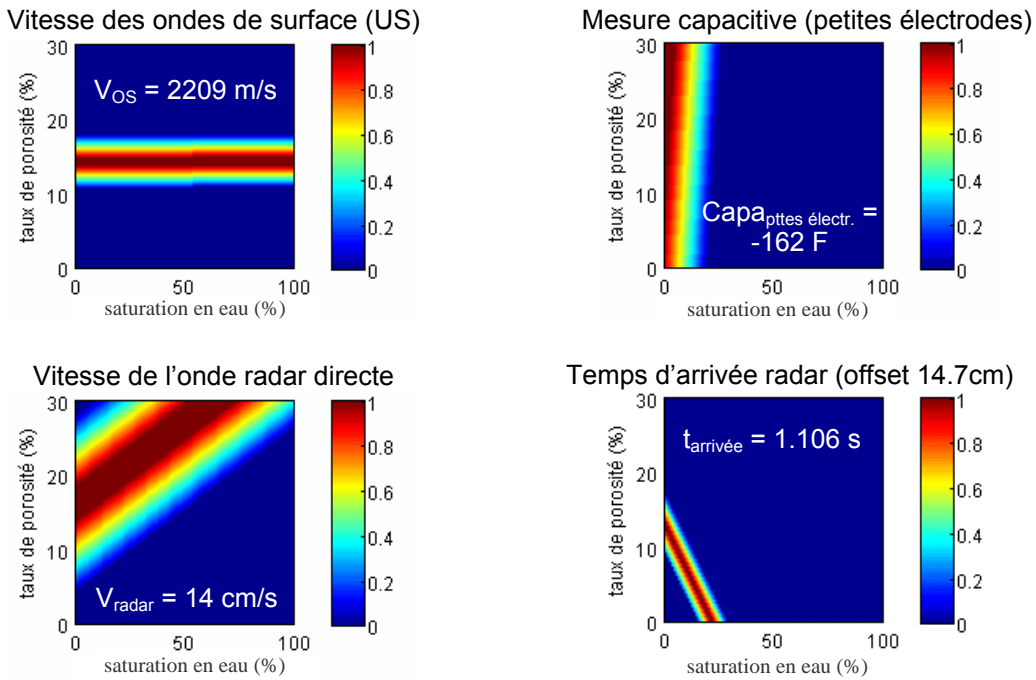


Figure 4 : Exemples de distributions de possibilités (en vue de dessus) pour des valeurs mesurées de quatre observables.

COMBINAISON DES DISTRIBUTIONS

Opérateur choisi

Différents opérateurs de la littérature ont été testés [6,7,8]. Nous avons choisi d'utiliser un opérateur adaptatif développé par Delmotte [7], qui passe de manière continue d'un comportement conjonctif à un comportement disjonctif en fonction de la fiabilité moyenne des sources (i.e. des observables). Il s'écrit de la façon suivante (forme non normalisée) :

$$\pi(p,s) = (1 - \alpha^2) \max_i(t_i \pi_i(p,s)) + \alpha^2 \min \left[\min_i(1 - t_i + t_i \pi_i(p,s)), \max_i(\pi_i(p,s)) \right]$$

où p et s désigne le taux de porosité et le degré de saturation,

$\pi_i(p,s)$ est la distribution de possibilités fournie par la source i ,

t_i désigne la fiabilité globale de la source i (détaillée dans le paragraphe suivant),

et $\alpha = \frac{1}{n} \sum_{i=1}^n t_i$ est la moyenne arithmétique des fiabilités des n sources d'information.

Pour résumer, lorsque peu de sources sont fiables (α tend vers 0), le comportement de l'opérateur tend vers le mode disjonctif (« max » dans le premier terme), et alors que quand la plupart des sources sont très fiables (α tend vers 1), l'opérateur devient plutôt conjonctif (« min » du second terme) avec une gestion du conflit le cas échéant (terme entre crochets).

Contrairement à beaucoup d'opérateurs adaptatifs fonction du niveau de conflit, cet opérateur a l'avantage de prendre explicitement en compte la fiabilité des sources. Prenons l'exemple concret de 10 sources, dont 9 sont très fiables et la dernière non. Alors le résultat de la fusion avec l'opérateur choisi tendra vers l'intersection des 9 sources fiables, ce qui ne serait pas forcément le cas avec un autre opérateur adaptatif.

Notion de fiabilité

L'opérateur choisi adopte un comportement qui dépend des « fiabilités globales » des sources. La fiabilité est donc un paramètre très important qu'il est nécessaire de bien comprendre et définir. Deux types de fiabilité peuvent entrer en jeu dans la fiabilité globale :

- La fiabilité propre :

Elle désigne la fiabilité de la source en général, pour l'évaluation des paramètres recherchés. Dans le cas d'informations fournies par des experts, il est possible d'estimer leur fiabilité en évaluant les performances de chacun. Dans le cas de capteurs, la fiabilité peut être donnée soit par un expert, soit par des essais etc. Dans notre étude, nous avons attribué à la fiabilité propre des observables un indice de qualité obtenu à l'issue du traitement statistique des campagnes de mesures du projet SENSO.

- La fiabilité de concordance :

Elle permet de rendre compte, le cas échéant, d'un problème ponctuel (panne, défaillance d'un capteur, erreur de procédure...), même si l'observable est très fiable en général (fiabilité propre). La fiabilité de concordance d'une source représente le degré de ressemblance entre les informations qu'elle a fournies par rapport à toutes les autres sources.

La fiabilité globale de chaque observable, notée t_i précédemment, est alors calculée en faisant par exemple la moyenne de ces deux fiabilités. Par ce biais, si par exemple une source est très fiable, mais qu'un problème surgit au moment de la mesure, et que cette source donne alors des informations incohérentes, alors sa fiabilité globale sera diminuée par sa faible fiabilité de concordance. La prise en compte de ces deux fiabilités permet une approche plus réaliste du problème.

CRITERE DE DECISION

La visualisation de la distribution fusionnée permet d'observer facilement la plage solution lorsqu'on applique le critère de seuil. Cependant, comme nous le verrons dans les exemples d'application, nous utilisons aussi le critère du maximum lorsque seul un ordre de grandeur du résultat est nécessaire.

EXEMPLES D'APPLICATION

La figure 5 montre un exemple de visualisation des distributions à fusionner et de la distribution fusionnée. La plage solution avec un seuil de l'ordre de 0.9 est clairement visible et donne un taux de porosité entre 15 et 17% et un degré de saturation entre 90 et 100%, sachant que les valeurs mesurées des deux indicateurs sont 15.9% pour la porosité et 100% pour la saturation.

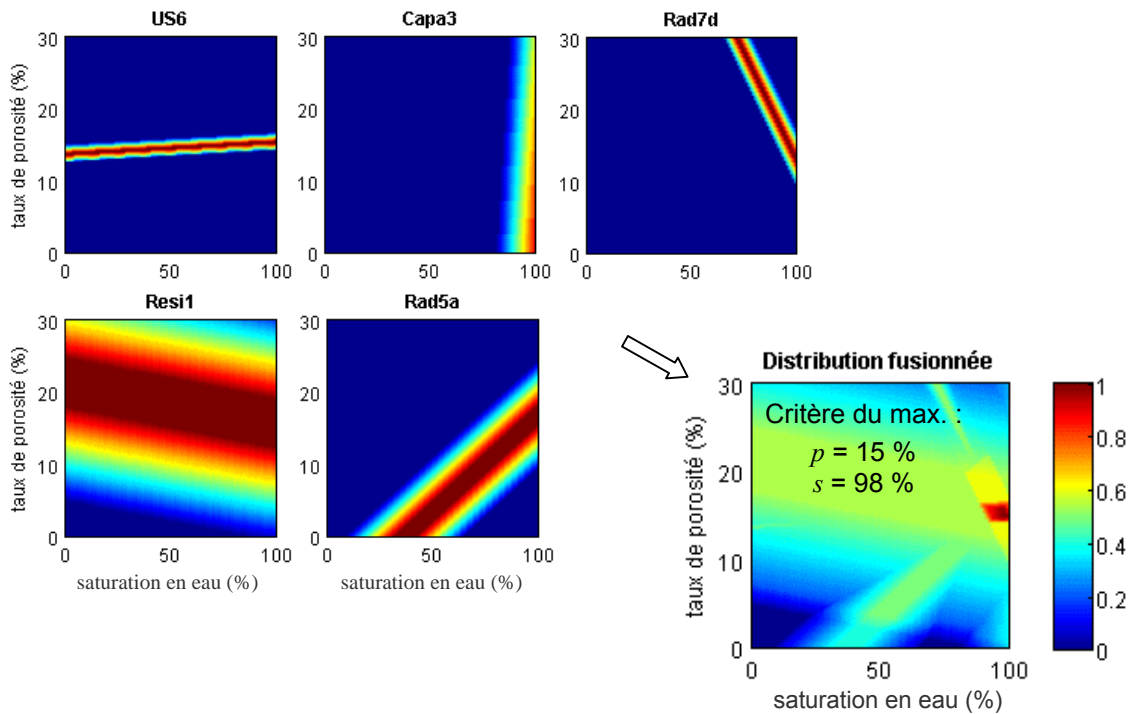


Figure 5 : Exemple de fusion pour cinq observables (1 mesure ultrasonore, 1 mesure capacitive, 1 mesure de résistivité et 2 mesures radar) : le résultat attendu est $p = 15.9\%$ et $s = 100\%$.

Pour des raisons de lisibilité, nous utilisons à présent le critère de maximum pour présenter et résumer dans le tableau 2 quelques tests réalisés, pour différentes éprouvettes (E) de différentes gâchées (G) au deux niveaux de saturation théoriques : 0% et 100%.

On note une très bonne cohérence entre les résultats de la fusion et les valeurs mesurées : les écarts maximums sont de 1.2 pts pour la porosité et de 8 pts pour la saturation.

		G3-E1	G3-E6	G3a-E1	G3a-E5	G7-E5	G7-E6	G8-E1	G8-E5
Taux de porosité (%)	Fusionné	15.2	14.8	16	14.8	15.8	15	18.6	18
	Mesuré	15.5	15.5	16	16	15.9	15.9	18.1	18.1
Saturation en eau (%)	Fusionné	0	100	0	94	8	98	4	92
	Mesuré	0	100	0	100	0	100	0	100

Tableau 2 : Comparaison de quelques résultats de fusion (critère du max.) avec les valeurs mesurées du taux de porosité et du degré de saturation.

CONCLUSIONS ET PERSPECTIVES

La fusion dans le cadre du projet ANR SENSO a pour but de fournir une estimation des indicateurs de structures en béton à partir de plusieurs techniques non destructives. Les estimations fournies par chaque technique individuellement sont imprécises, en particulier en raison des corrélations empiriques établies entre les observables et les indicateurs. C'est pourquoi la technique de fusion choisie est basée sur la théorie des possibilités.

Plusieurs choix ont été faits, du point de vue de la forme des distributions (trapèze), du type d'opérateur de combinaison (qui adapte son comportement en fonction de la fiabilité des sources) et de la prise en compte de la fiabilité de concordance. Ces différents choix

aboutissent à des résultats de fusion très proches des valeurs mesurées des deux indicateurs considérés, le taux de porosité et le degré de saturation en eau.

Les nouvelles campagnes de mesures vont permettre d'avoir les valeurs intermédiaires de degré de saturation. Les corrélations seront alors ajustées, et de nouveaux cas pourront être testés afin de vérifier le processus de fusion.

REMERCIEMENTS

Les auteurs remercient les autres partenaires du projet ANR SENSO, piloté par le LMDC (Université Paul Sabatier de Toulouse) : CDGA (Université de Bordeaux I), GEA (Ecole Centrale de Lille), LCPC (Nantes), pour la réalisation de la grande base de données de CND utilisée.

REFERENCES BIBLIOGRAPHIQUES

- [1] Moysan, J., Durocher, A., Gueudré, C. & Corneloup, G., Improvement of the Non-Destructive Evaluation of Plasma Facing Components by Data Combination of Infrared Thermal Images, NDT&E International, Vol. 40, 2007, pp. 478-485
- [2] Kaftandjian, V., Dupuis, O., Babot, D. & Zhu, Y.M., Uncertainty Modelling using Dempster-Shafer Theory for Improving Detection of Weld Defects, Pattern Recognition Letters, Vol. 24, 2003, pp. 547-564
- [3] Bezdek, J.C., Dubois, D. & Prade, H., Fuzzy Sets in Approximate Reasoning and Information Systems, Kluwer Academic Publishers, 1999
- [4] Dubois, D. & Prade, H., La Fusion d'Informations Imprécises, Traitement du Signal, Vol. 11, No. 6, 1994, pp. 447-458
- [5] Bouchon-Meunier, B. & Marsala, C., Logique Floue, Principes, Aide à la Décision, Hermès-Lavoisier, 2003
- [6] Bloch, I., Fusion d'Informations en Traitement du Signal et des Images, Hermès-Lavoisier, 2003
- [7] Delmotte F., Un Nouvel Opérateur de Fusion Adaptatif, Traitement du Signal, Vol. 17, No. 5, 2000, pp. 299-311
- [8] Bouyssou, D., Dubois, D., Pirlot, M. & Prade, H., Concepts et Méthodes pour l'Aide à la Décision Vol. I, II & III, Hermès-Lavoisier, 2006