

---

## Aide à la décision pour l'expertise des barrages

**Aurélie Talon \*** – **Corinne Curt \*\*** – **Daniel Boissier \*** – **Gilles Mauris \*\*\***

\* *Clermont Université, Polytech'Clermont-Ferrand, Laboratoire de Mécanique et Ingénieries*  
24, Avenue des Landais – BP 206 – 63174 Aubière Cedex  
aurelie.talon@polytech.univ-bpclermont.fr  
daniel.boissier@polytech.univ-bpclermont.fr

\*\* *Cemagref – Unité Ouvrages Hydrauliques et Hydrologie*  
3275 Route Cézanne – CS 40061 – 13182 Aix en Provence Cedex 5  
corinne.curt@cemagref.fr

\*\*\* *LISTIC, Polytech'Savoie*  
BP 80439 – 74944 Annecy le Vieux Cedex  
gilles.mauris@univ-savoie.fr

---

*RÉSUMÉ. Un modèle d'évaluation des performances des barrages vis-à-vis de leurs principaux modes de rupture et de dégradation a été développé (Curt, 2008). Les données d'entrée (indicateurs) et de sortie (performance du barrage) de ce modèle sont des distributions de possibilité. Cette communication est axée sur la problématique de la prise de décision associée à ce résultat possibiliste : comment prioriser les actions de maintenance à entreprendre sur le barrage et comment transmettre l'information aux gestionnaires ? Nous proposons une analyse comparative des méthodes de défuzzification afin de sélectionner les méthodes répondant le mieux à cette problématique d'aide à l'expertise des barrages.*

*ABSTRACT. An assessment model of dam performances as regards their main failure modes and degradation modes was developed (Curt, 2008). The input data (indicators) and the output data (dam performance) of this model are possibility distributions. This paper focuses on the problematic of decision making associated to this possibility result: how to classify maintenance actions that have to be made on that dam and how to convey this result to dam managers? A comparative analysis of defuzzification methods is provided; those methods allow to best answer to this problematic of dam expertise.*

*MOTS-CLÉS : barrage – defuzzification – données imparfaites – logique floue.*

*KEYWORDS: dam – defuzzification – imperfect data – fuzzy logic.*

---

## 1. Introduction

En ingénierie, la prise de décision ne peut se faire efficacement que sur une quantité d'information réduite représentant au mieux la globalité de l'évaluation menée pour une problématique. Par exemple, on statuera sur la résistance d'un ouvrage par comparaison à sa sollicitation ; résistance et sollicitation découlent d'études déterministes, statistiques ou probabilistes poussées. En approche possibiliste / floue (Dubois et al., 1988), cette phase de réduction des résultats d'une évaluation est la défuzzification.

Nous détaillons dans la partie suivante la problématique d'évaluation de la performance des barrages, la troisième partie rappelle la terminologie des sous-ensembles flous puis détaille les principales méthodes de défuzzification existantes. La démarche de sélection des méthodes de défuzzification les plus à même de répondre à la problématique de l'évaluation de la performance des barrages est présentée en partie 4. La partie 5 est consacrée à une application académique des méthodes sélectionnées dans le contexte des barrages.

## 2. Problématique d'évaluation de la performance des barrages

La maîtrise des risques de rupture des barrages est d'une importance majeure dans notre société de part les enjeux associés (populations, constructions, économiques,...). Cette maîtrise des risques passe par l'évaluation et le contrôle des performances des barrages vis-à-vis de leurs principaux modes de rupture et de dégradation (érosion interne, tassement, surverse,...).

Une méthode d'évaluation de la performance des barrages (schématisée à la Figure 1) a été proposée (Curt, 2008) ; elle est basée sur le recueil, la formalisation et l'agrégation de quatre types de données constituant le système d'évaluation : observations visuelles (tâche d'humidité sur le parement aval, fontis,...), données d'auscultation (mesure de débit, piézométrie,...), données issues de modèles mécaniques (résistance au cisaillement, gradient hydraulique,...), données de conception ou de réalisation (pente, densité,...). Ces données sont modélisées sous forme de distributions de possibilité afin de prendre en compte les imperfections inhérentes à ces données : incertitudes, imprécisions et incomplétudes. L'agrégation des indicateurs est menée par des opérateurs maximum flous et des règles floues. Le résultat de cette agrégation est une distribution de possibilité représentant la performance d'un barrage vis-à-vis de ses principaux modes de rupture.

Les problématiques d'aide à la décision pour l'expertise des barrages, associées à ce résultat, sont de deux ordres : comment prioriser les actions de maintenance à entreprendre sur le barrage ? Comment transmettre l'information aux gestionnaires ?

Une réponse à la première problématique est de pouvoir comparer, pour un même barrage, ses performances vis-à-vis de plusieurs modes de rupture. Une

réponse à la seconde problématique est de fournir une ou plusieurs informations simples et représentatives des performances obtenues sous un format flou.

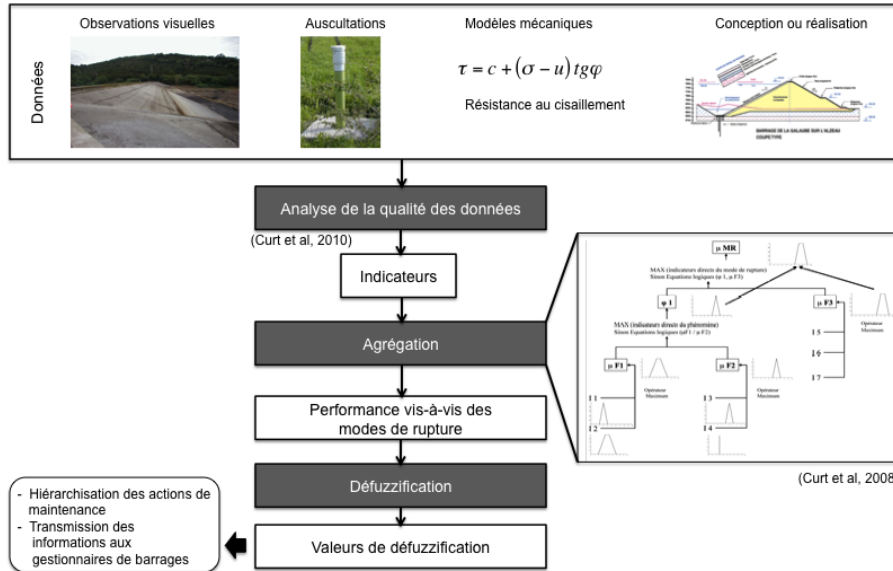


Figure 1. Méthode d'évaluation de la performance des barrages

### 3. Sous-ensembles flous et méthodes de défuzzification

#### 3.1 Sous-ensembles flous pour l'expertise des barrages

Les approches possibilistes sont utilisées dans l'évaluation de la performance des barrages dans la mesure où elles permettent de représenter tous les formats de données et ainsi de prendre en compte l'ensemble des données hétérogènes disponibles quels soient leur format, leur origine et leur niveau de granularité. La terminologie usuelle d'un sous-ensemble flou est détaillée à la Figure 2.

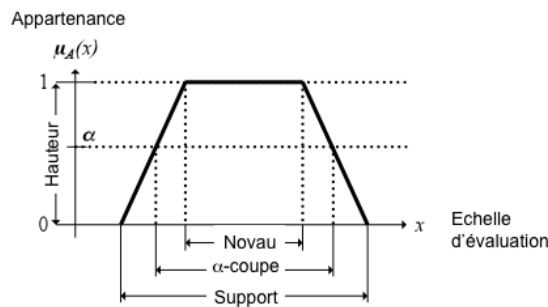


Figure 2. Terminologie d'un sous-ensemble flou

#### 4 Communication TS3\_TCBM

Dans le contexte de l'expertise des barrages :

- l'échelle d'évaluation a été définie par un panel d'experts ; elle varie de 0 (excellent) à 10 (inacceptable),
- des distributions de possibilité sont utilisées pour représenter les imperfections (hauteur est égale à 1, sous-ensembles flous sont normés),
- le noyau, déclaré par un expert, désigne les valeurs jugées les plus vraisemblables,
- le support, déclaré par un expert, désigne les valeurs jugées possibles,
- une interpolation linéaire est faite entre le noyau et le support.

### 3.2 Méthodes de défuzzification

Quatre types de méthodes de défuzzification ont été étudiés :

- les méthodes donnant une valeur réelle,
- les méthodes donnant un intervalle réel,
- les méthodes de classement des sous-ensembles flous,
- les méthodes évaluant une dispersion.

Les *méthodes de défuzzification donnant une valeur réelle* (Leekwijck et al., 1999 ; Leekwijck et al., 2001 ; Liu et al., 2007 ; Roychowdhury, 2001) visent à synthétiser la globalité des informations contenues dans un sous-ensemble flou en une unique valeur. Deux grandes familles existent : (1) les méthodes calculant le centre de gravité du sous-ensemble flou et les méthodes dérivées qui prennent éventuellement en compte les pondérations associées à la fonction d'appartenance, (2) les méthodes fournissant les valeurs des bornes supérieures ou inférieures du support ou du noyau.

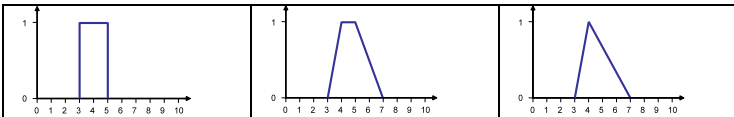
Les *méthodes de défuzzification par des intervalles réels* consistent à représenter au mieux la dispersion du sous-ensemble flou défuzzifié. Un intervalle de valeurs, contrairement à une valeur unique, permettra de mieux distinguer deux sous-ensembles flous ayant des dispersions distinctes. En effet, deux sous-ensembles flous peuvent avoir un centre de gravité commun avec des dispersions, donc des incertitudes, différentes. Nous ne détaillons pas ici ces méthodes puisqu'elles n'ont pas été sélectionnée dans l'application barrages. Le lecteur intéressé pourra se reporter aux principales formulations proposées par (Dubois et al., 1987 ; Carlson et al., 2002 ; Bodjanova, 2005 ; Grzegorzewski, 2002 ; Chanas, 2001). A titre d'illustration, le tableau 1 présente les résultats obtenus par ces différentes méthodes de défuzzification sur un intervalle flou, un sous-ensemble flou et un nombre flou représentatifs de l'expertise des barrages.

Les *méthodes de défuzzification classant des sous-ensembles flous* sont de trois types :

– les méthodes procédant à une défuzzification pour obtenir une valeur réelle puis classant l'ensemble des valeurs réelles obtenues. Les méthodes associées à la première phase de défuzzification (obtention d'une valeur réelle) ont été présentées ci-avant.

– les méthodes comparant les sous-ensembles flous à un (ou des) sous-ensemble(s) flou(s) de référence. Les références majeures à ces méthodes sont celles de (Chen et al., 1999 ; Fortemps et al., 1996 ; Wang et al., 2001a et b). Les méthodes sélectionnées pour l'application barrages sont détaillées en partie 3.

– les méthodes comparant les sous-ensembles flous deux à deux. Ces méthodes, telles que présentées dans (Asady et al., 2006 ; Dubois et al., 1983 ; Wang et al. 2001a et b) prennent en compte l'ensemble des fonctions d'appartenance des sous-ensembles flous comparés. N'ayant pas été retenues pour l'expertise des barrages, nous ne les détaillerons pas ici.



Dubois et al.	[3 ; 5]	[3,5 ; 6]	[3,5 ; 5,5]
Carlson et al.	[3 ; 5]	[3,67 ; 5,67]	[3,67 ; 5]
Boajanova	[3 ; 5]	[3,67 ; 5,67]	[3,67 ; 5]
Grzegorzewski	[3 ; 5]	[3,5 ; 6]	[3,5 ; 5,5]
Chanas	[3 ; 5]	[3,5 ; 5]	[3,5 ; 4,5]

**Tableau 1.** Comparaison des données fournies par cinq méthodes de défuzzification par intervalles

Plusieurs méthodes de défuzzification évaluant la dispersion d'un sous-ensemble flou ont également été étudiées de manière à pouvoir intégrer ce paramètre dans la prise de décision ; elles sont basées sur les concepts : d'entropie, de spécificité relative et de distance moyenne au centre de gravité.

Ici, l'entropie coïncide avec celle définie par Shannon (Shannon, 48), (Weaver, 75), dans le cadre de la théorie de l'information. Dans notre contexte, l'entropie est utilisée pour évaluer l'incertitude associée à une donnée. Nous considérons que cette incertitude est inversement proportionnelle à la dispersion de sa masse de croyance sur le cadre de discernement ( $[0 ; 10]$  pour l'application barrages); c'est-à-dire qu'une donnée centrée en une valeur présentera moins d'incertitude qu'un intervalle de données incluant cette valeur (reflétant plus d'incertitude dans l'évaluation). Selon la symbolique de la Figure 2, l'entropie relative d'une donnée est égale à :

$$H = \frac{- \sum_{x \in [\min ; \max]} \mu(x) \cdot \ln(\mu(x))}{-\ln\left(\frac{1}{\max - \min}\right)} \quad [3]$$

La spécificité relative correspond à la spécificité de la distribution de possibilité divisée par la spécificité de la distribution de possibilité correspondant à l'ignorance complète (c'est-à-dire ayant un degré d'appartenance de 1 pour toute l'échelle d'évaluation). Elle est définie par :

$$S = \frac{\int_{x=\min}^{\max} \mu(x) \cdot dx}{\max - \min} \quad [4]$$

La distance moyenne au centre de gravité est donnée par :

$$DM = \frac{\int_{\alpha=0}^1 \left( \frac{\int_{x=\min}^{\max} x \cdot \mu(x) \cdot dx}{\int_{x=\min}^{\max} \mu(x) \cdot dx} - x_L(\alpha) \right) \cdot d\alpha + \int_{\alpha=0}^1 \left( x_R(\alpha) - \frac{\int_{x=\min}^{\max} x \cdot \mu(x) \cdot dx}{\int_{x=\min}^{\max} \mu(x) \cdot dx} \right) \cdot d\alpha}{\int_{\alpha=0}^1 4\alpha \cdot d\alpha} \quad [5]$$

#### 4. Sélection des méthodes de défuzzification dans le cas de l'application barrage

La sélection des méthodes de défuzzification les mieux adaptées à l'application barrage s'est faite, auprès d'un panel d'experts barragistes, en trois phases itératives :

- recueil des attentes des experts,
- analyse des réponses à ces attentes proposées par des méthodes existantes (méthodes donnant une valeur réelle, méthodes donnant un intervalle réel, méthodes de classement des sous-ensembles flous, méthodes d'évaluation de la dispersion d'un sous-ensemble flou),
- présentation des méthodes et de leur analyse critique aux experts en séances plénières.

Les experts souhaitaient avoir plusieurs types d'information permettant d'interpréter la performance, sous forme floue, d'un barrage vis-à-vis d'un mode de rupture :

- pour l'aide à la décision : des méthodes de comparaison des sous-ensembles flous lorsqu'ils sont dans la même gamme de notation,
- pour la transmission d'information aux gestionnaires de barrage : une information synthétique qui intègre la globalité de l'information contenue dans les sous-ensembles flous.

Les experts souhaitaient une valeur de défuzzification qui prenne en compte la dispersion du sous-ensemble flou. Les valeurs souhaitées devaient être à droite du centre de gravité pour prendre en compte l'aspect sécuritaire de leur raisonnement ; la distance au centre de gravité devant être d'autant plus grande que la dispersion est importante.

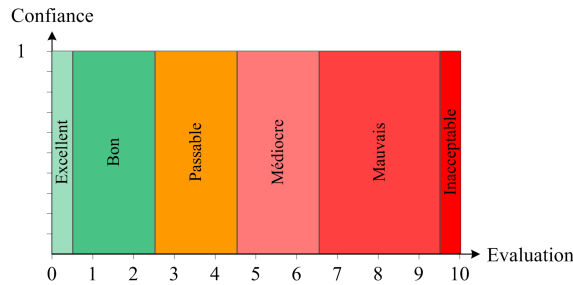
L'analyse de leurs besoins s'est traduite par la mise en œuvre des méthodes présentées dans le tableau 2.

Objectif	Méthodes de défuzzification retenues pour l'expertise des barrages
Communication	<ol style="list-style-type: none"> <li>1. Valeur de défuzzification : borne supérieure de l'<math>\alpha</math>-coupe à 0,8 (valeur réelle),</li> <li>2. Description qualitative : pourcentage de correspondance entre le sous-ensemble flou et les intervalles de référence,</li> <li>3. Interprétation qualitative de la dispersion à partir de la spécificité relative.</li> </ol>
Aide à la décision	Classement des sous-ensembles par rapport à la valeur moyenne de l' $\alpha$ -coupe à 0,8.

**Tableau 2.** Méthodes de défuzzification retenues pour l'expertise des barrages

La valeur de 0,8 pour l' $\alpha$ -coupe a été choisie par les experts en considérant la correspondance entre les fractiles (approche probabiliste) et les valeurs d'appartenance (approche possibiliste) telle que définie dans (Baudrit et al., 2003 ; Vick, 1997). En effet, les experts ont choisi une valeur de défuzzification qui correspond à une valeur entre « moyennement probable » et « probable ».

Les sous-ensembles flous de référence retenus pour la description qualitative sont présentés à la Figure 3.



**Figure 3.** Représentation des six classes de référence de l'application barrage

Les pourcentages de correspondance sont calculés à partir du degré de compatibilité normé (Curt, 2008). Le degré de compatibilité normé d'un sous-ensemble flou,  $SEF_i$ , par rapport à une classe d'évaluation  $C_j$  ( $j \in [1 ; n]$  ;  $n = 6$  pour l'application barrage) est donné par :

$$\overline{DC}_{SEF_i}^{C_j} = \frac{DC_{SEF_i}^{C_j} \times 100}{\sum_{j=1}^n DC_{SEF_i}^{C_j}} \quad [1]$$

avec

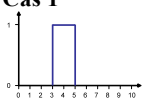


$$DC_{SEF_i}^{C_j} = \frac{S_i}{S_{SEF_i} + S_{C_j} - S_i} \quad [2]$$

$S_j$  représente la surface d'intersection entre le sous-ensemble flou  $SEF_i$  et la classe d'évaluation  $C_j$  (excellent, bon, passage, médiocre, mauvais, inacceptable).  $S_{SEF_i}$  représente la surface du sous-ensemble flou  $SEF_i$ ,  $S_{C_j}$  représente la surface de la classe d'évaluation  $C_j$ .

L'interprétation qualitative de la dispersion est établie en associant des catégories de dispersion (« pas de dispersion » -  $S = 0$ , « dispersion faible » -  $S < 0,15$ , « dispersion importante » -  $S \leq 0,25$  et « dispersion très importante » -  $S > 0,25$ ) à des sous-ensembles flous types à partir de leur spécificité relative. La catégorie de dispersion de la distribution étudiée est alors définie par comparaison à ces catégories de référence.

### 5. Application académique

A titre d'illustration des méthodes de défuzzification sélectionnées pour l'expertise des barrages, le Tableau 3 synthétise les valeurs obtenues pour trois exemples de sous-ensembles flous, représentant l'évaluation de la performance d'un barrage vis-à-vis de trois modes de rupture ou de dégradation, selon les méthodes du Tableau 2.

Méthodes de défuzzification	Cas 1 	Cas 2 	Cas 3 
Communication - Valeur de défuzzification	5	5,4	4,6
Communication - Description qualitative	75% passable 25% médiocre	37,3% passable 61,2% médiocre 1,5% mauvais	67,6% passable 30,6% médiocre 1,8% mauvais
Communication - Interprétation qualitative de la dispersion	Dispersion faible	Dispersion très importante	Dispersion très importante
Aide à la décision	4	4,6	4,2
	Ordre de performance décroissant : Cas 1 – Cas 3 – Cas 2		

**Tableau 3.** Valeurs de défuzzification de distributions de possibilité obtenues à partir des méthodes sélectionnées pour l'expertise des barrages

### 6. Conclusion

Une démarche d'aide à la décision pour l'expertise des barrages a été proposée sous la forme d'une sélection de méthodes de défuzzification permettant de répondre aux deux problématiques associées à cette décision : pouvoir comparer un ensemble de performances de barrages dans un but de détermination d'actions correctives et pouvoir transmettre le résultat de l'expertise aux gestionnaires de barrages.

Cette démarche de sélection d'une méthode de défuzzification doit être menée avec les futurs utilisateurs (décideurs) de cette méthode. Dans notre cas, elle a abouti à la sélection de deux types de méthodes : une méthode déterminant une valeur de défuzzification représentative de la moyenne pessimiste de la performance (borne supérieure de l' $\alpha$ -coupe à 0,8) et une méthode déterminant la dispersion représentative de l'étendue de la distribution de possibilité associée à cette performance.

Une condition sine qua non à l'obtention d'une défuzzification pertinente est que la distribution représentant une performance prenne bien en compte l'ensemble des imperfections attachées aux données d'entrée du modèle d'évaluation des performances. Une démarche d'analyse et de contrôle de ces données d'entrée est présentée dans (Curt et al, 2010).

La démarche appliquée sur des cas académiques doit maintenant être testée sur des cas simplifiés avant un passage à l'échelle réelle.

Au delà du contexte d'expertise des barrages, la phase de défuzzification sur laquelle repose la prise de décision doit être représentative de la globalité des informations d'imperfection (imprécision, incertitude et incomplétude) contenues dans un sous-ensemble flou et des attentes des décideurs. Il paraît donc essentiel que les résultats d'une défuzzification intègre des valeurs représentatives de la forme et de l'étendue du sous-ensemble flou.

## 7. Références bibliographiques

- Asady B., Zendehnam A., "Ranking fuzzy numbers by distance minimization". *Applied Mathematical Modelling*, vol. 31, 2007, pp. 2589–2598.
- Baudrit C., Dubois D., Fargier H., "Représentation de la connaissance probabiliste incomplète". *Actes Rencontres Francophones sur la Logique Floue et ses Applications (LFA'2003)*, Tours, France, 26-27/11/2003.
- Bodjanova S., "Median value and median interval of a fuzzy number". *Information sciences*, vol. 172, 2005, pp. 73-89.
- Carlsson C., Fuller R., "Fuzzy Reasoning in Decision Making and Optimization". *Physica-Verlag*, 2002, Heidelberg.
- Chanas S., "On the interval approximation of a fuzzy number", *Fuzzy Sets and Systems*, vol. 122, 2001, pp. 353-356.
- Chen L.H., Lu H.W., "An Approximate Approach for Ranking Fuzzy Numbers Based on Left and Right Dominance". *Computers and Mathematics with Applications*, vol. 41, 1999, pp. 1589-1602.
- Curt C., Talon A., "Analyse et contrôle de la qualité des données utilisées lors des expertises de barrages". *Fiabilité des Matériaux et des Structures 2010 - 6èmes Journées Nationales de Fiabilité*, Toulouse, France, 23-25/03/2010.

- Curt C., Talon A., Mauris G., "Using physical measurements, sensory evaluations and expert judgments in a dam assessment support system ". 12th IMEKO TC1 & TC7 Joint Symposium on Man Science & Measurement, Annecy, France, 03-05/09/2008.
- Curt C., Evaluation de la performance des barrages en service basée sur une formalisation et une agrégation des connaissances. Thèse de doctorat, Université Blaise Pascal – Clermont II, 2008.
- Dubois D., Prade H., "Théorie des possibilités: application à la représentation des connaissances en informatique". Paris: Masson, 1988.
- Dubois D., Prade H., "The mean value of a fuzzy number". Fuzzy Sets and Systems, vol. 24, 1987, pp. 179–300.
- Dubois D., Prade H., "Ranking fuzzy numbers in the setting of possibility theory". Information Sciences, vol. 30, 1983, pp. 183-224.
- Fortemps P., Roubens M., "Ranking and defuzzification methods based on area compensation". Fuzzy Sets and Systems, vol. 82, 1996, pp. 319-330.
- Grzegorzewski P., "Nearest interval approximation of a fuzzy number". Fuzzy Sets and Systems, vol. 130, 2002, pp. 321-330.
- Leekwijck W.V., Kerre E.E., "Continuity focused choice of maxima: Yet another defuzzification method". Fuzzy Sets and Systems, vol. 122, n°2, 2001, pp. 303–314.
- Leekwijck W.V., Kerre E.E., "Defuzzification: criteria and classification". Fuzzy sets and systems, vol. 108, 1999, pp. 159-178
- Liu X., "Parameterized defuzzification with maximum entropy weighting function – Another view of the weighting function expectation method". Mathematical and computer modelling, vol. 45, 2007, pp. 177-188.
- Roychowdhury S., Pedrycz W., "A survey of defuzzification strategies". International Journal of Intelligent Systems, vol. 16, 2001, pp. 679–695.
- Shannon C.E., "A Mathematical Theory of Communication". The Bell System Technical Journal, vol. 27, 1948, pp. 379-423 et 623-656.
- Vick S.G., "Dam safety risk assessment: new directions". Water Power and Dam Construction, vol. 49, n°6, 1997.
- Wang X., Kerre E.E., "Reasonable properties for the ordering of fuzzy quantities (I) ". Fuzzy Sets and Systems, vol. 118, 2001a, pp. 375-385.
- Wang X., Kerre E.E., "Reasonable properties for the ordering of fuzzy quantities (II) ". Fuzzy Sets and Systems, vol. 118, 2001b, pp. 387-405.
- Weaver W., Shannon C. E., Moles A.A., Cosnier J., Théorie mathématique de la communication, Paris : C.E.P.L., 1975.