

## Analyse Multicritère de Capteurs Satellitaires et Aéroportés Pour le Suivi du Couvert Nival

D. MARTIN<sup>1</sup>

**RÉSUMÉ :** En raison des problèmes techniques et économiques posés par l'éloignement des centres de production d'électricité, les gestionnaires d'Hydro-Québec s'intéressent de plus en plus aux possibilités de suivi du couvert nival par télédétection. Nous avons effectué un rangement préliminaire parmi 10 capteurs satellitaires et aéroportés (dans les bandes visibles, infra-rouges et hyperfréquences) susceptibles de fournir des mesures de suivi du couvert nival. En raison de la diversité des critères impliqués, nous avons choisi une méthode d'analyse multicritère : PROMÉTHÉE II. Cette méthode permet d'intégrer facilement les préférences des décideurs. Nous avons effectué l'analyse à partir des 6 critères suivants : le prix des images brutes, la fréquence de passage, la flexibilité, la situation opérationnelle, la polyvalence et l'origine du capteur.

Cette analyse nous a permis, en premier lieu, d'apprécier la souplesse d'utilisation de PROMÉTHÉE II et, ensuite, de faire ressortir l'immense potentiel des capteurs hyperfréquences, en particulier celui de RADARSAT. Le rangement des capteurs ne constituant pas une fin en soi, nous comptons utiliser cette analyse pour élaborer des scénarios d'utilisation des capteurs dans lesquels nous pourrions tirer parti de la complémentarité entre certains d'entre eux.

Mots-clés : Neige, capteurs satellitaires et aéroportés, analyse multicritère.

**ABSTRACT :** The great distances between production areas and hydroenergy consumers cause technical and economical problems to Hydro-Quebec forecasters. For these reasons, they are more and more interested to follow the evolution of the snowpack with remote sensing platforms. We performed a preliminary ranking among 10 spaceborne and airborne sensors. Due to the large diversity of criteria involved, we used a multicriteria method : PROMÉTHÉE II. We chose this method because it permitted the easy integration decision maker's preference. We used 6 criteria : the price of raw images, the repetitivity, the flexibility, the operational situation, the polyvalence and origin of the sensor.

Firstly, this study permitted to appreciate the great flexibility of PROMÉTHÉE. Secondly, this multicriteria analysis highlights the large potential of microwave sensors, particularly those of the newborn canadian satellite RADARSAT. This preliminary study will give us, in the future, the opportunity to elaborate scenarios using combinations of sensors having different wavelengths bands.

Key words : Snow, spaceborne and airborne sensors, multicriteria analysis.

### INTRODUCTION

Au Québec, plus de 90 % de l'électricité produite est d'origine hydraulique. Climat et topographie de la province plaident en faveur de l'option hydro-électrique. D'abord générée par des centrales situées à proximité des grands centres urbains (Carillon, Beauharnois), cette électricité provient maintenant de régions fort éloignées des centres de consommation importants comme la Baie James et la Côte-Nord. La prévision hydrologique est un élément-clé dans la gestion optimale des barrages et les enjeux financiers liés à la qualité des prévisions sont importants. Plusieurs études dont celles de Yeh et al (1978) et de Castruccio et al. (1980) ont souligné les impacts de la surestimation et de la sous-estimation des apports au niveau des réservoirs et des centrales. Dans le territoire de la Baie James, la neige constitue environ 40 % des apports annuels en eau. Pour établir les prévisions hydrologiques appropriées en période hivernale, Hydro-Québec utilise un système qui intègre des mesures recueillies par des instruments placés à différents endroits du bassin et effectue des lignes de neige.

En raison des problèmes techniques et économiques que pose la collecte des données sur un territoire représentant 20 % de la superficie du Québec et situé à quelque 1000 km de la métropole, Hydro-Québec s'intéresse, depuis plusieurs années, à l'intégration de mesures satellitaires et aéroportées de suivi du couvert nival dans les modèles de prévisions hydrologiques. Afin de guider les gestionnaires dans cette approche, nous avons effectué un rangement parmi les capteurs existants ou potentiels (sur un horizon de temps s'étendant de 1995 à 2002) en fonction de

<sup>1</sup> INRS-Eau, Case postale 7500, Sainte-Foy, Québec, Canada GIV 4C7

critères déterminés par les décideurs eux-mêmes. Nous voulons, avant tout, guider les décideurs vers la solution qui répond le mieux possible à leurs attentes.

Un tel rangement justifie pleinement l'utilisation d'une approche multicritère car nous sommes en présence de critères variés : un de nature économique : le prix des images, d'autres à connotation technique : fréquence de passage, flexibilité, situation opérationnelle, polyvalence des capteurs et enfin d'un critère à saveur politique. Certains critères peuvent être multidimensionnels et le sens de l'optimisation peut varier d'un critère à l'autre. Comme le mentionne Schärli (1985) dans sa critique de l'approche monocritère, *il ne s'agit pas de dissoudre le problème dans son environnement mais de lui chercher une solution acceptable et réaliste compte tenu de cet environnement; un environnement dans lequel les critères d'appréciation sont multiples.*

Cet article se divise en quatre parties. La section suivante décrit le cas étudié. Dans une seconde partie, nous définirons les critères retenus, les échelles d'évaluation utilisées et le sens de l'optimisation. La troisième partie est consacrée à la présentation de la méthode multicritère utilisée : PROMÉTHÉE II (Brans *et al.*, 1984). Nous utiliserons ensuite cette méthode pour ranger les différents outils de mesure du couvert nival. Dans cette dernière partie, afin d'éclairer le jugement des décideurs sur le rangement final proposé, nous procéderons à une analyse de sensibilité pour vérifier la robustesse du résultat obtenu.

## 1. DESCRIPTION DU CAS

Le territoire de la Baie James couvre une superficie de 350 000 km<sup>2</sup> représentant les deux tiers de celle de la France<sup>1</sup>. La production brute des centrales d'Hydro-Québec fut de 140.5 TWh en 1994<sup>2</sup>. La contribution des centrales du complexe La Grande (Figure 1) représente presque la moitié de la production hydraulique au Québec.

<sup>1</sup> Société d'Énergie de la Baie James, 1987.

<sup>2</sup> Hydro-Québec, Rapport annuel 1994

Les immenses réservoirs du complexe permettent de stocker des quantités importantes d'eau pour assurer une production régulière en toute saison et pour se prémunir contre les années où les précipitations sont inférieures à la moyenne. L'amélioration des modes de prévision des crues printanières est une des priorités d'Hydro-Québec.

La grandeur du territoire nous a permis d'éliminer certains critères qui auraient été jugés importants dans le cadre d'une autre étude. Dans notre analyse, nous n'avons pas fait de discrimination basée sur la grandeur des pixels<sup>3</sup> alors que dans une étude en milieu urbain, il aurait été judicieux de choisir des capteurs avec une résolution très fine. Tous les capteurs de l'étude sont adaptés à des mesures sur de vastes territoires.

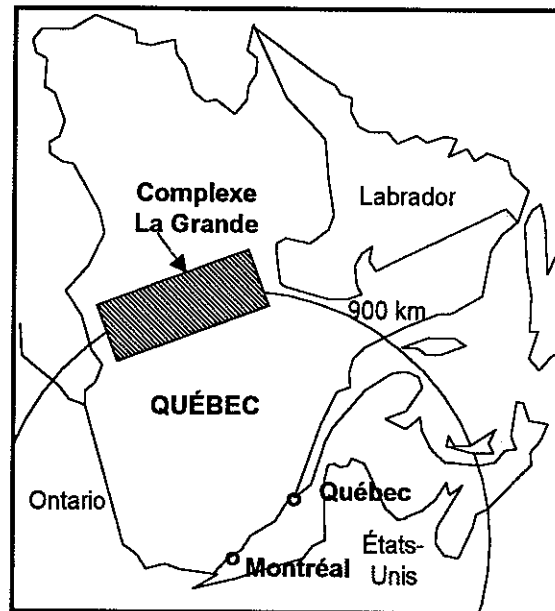


Figure 1 : Site d'étude

Les 10 actions choisies sont constituées de capteurs ou de modes d'acquisition de l'image

<sup>3</sup> Un pixel est la plus petite unité de surface qu'un capteur peut discriminer.

disponibles sur un seul capteur du satellite (cas de RADARSAT). Dans le tableau suivant, la plupart des capteurs sont assujettis à des plate-formes satellitaires, un seul est aéroporté : celui du Convair 580 du Centre Canadien de Télédétection. Les satellites ne transportent habituellement qu'un seul capteur imageur à l'exception de SPOT 4, dont le lancement est prévu en 1997, qui bénéficiera d'une technologie plus avancée et qui en transportera deux. Les dix (10) actions sont représentées dans le tableau 1.

Après avoir cerné le groupe d'actions, nous nous sommes penchés sur ce que devrait être un *critère* puis sur les *critères* à retenir pour effectuer le rangement des capteurs. La pondération des différents critères a été effectuée selon la méthodologie de Simos (1990), à la suite d'une enquête auprès d'un groupe d'experts

(INRS-Eau). Selon Simos et al. (1986), *les critères sont des expressions qualitatives ou quantitatives de points de vue, d'objectifs, d'aptitudes ou de contraintes relatives au contexte réel, qui permettent d'apprécier des alternatives*. Cette définition nous a paru tout à fait adaptée au contexte de notre étude. Nous n'avons conservé que six critères. Comme le souligne Simos, la pertinence des décisions humaines décroît significativement dès que plus que sept thèmes (*items*) sont jugés simultanément. Cependant, il ne faut pas :

- Omettre des critères;
- Considérer des critères redondants;
- Tenir compte d'expressions dont le sens des préférences ne fait pas l'unanimité.

Tableau 1 : Capteurs ou modes d'acquisition de l'image considérés dans l'analyse multicritère		
Plate-forme	Capteur (ou mode d'acquisition des données)	Spectre
LANDSAT 4 et 5	TM	Visible à Infra-rouge thermique
SPOT 1 et 2	HRV	Visible et Proche infra-rouge
SPOT 4	HRVIR	Visible et Proche infra-rouge
SPOT 4	VÉGÉTATION	Visible et Proche infra-rouge
NOAA	AVHRR	Visible à Infra-rouge thermique
DMSP F-8	SSM /I	Micro-ondes (passives)
ERS-1	AMI-SAR	Micro-ondes (radar)
RADARSAT	SCANSAR 500 KM	Micro-ondes (radar)
RADARSAT	STANDARD 100 KM	Micro-ondes (radar)
CONVAIR 580 (CCT)	AIRBORNE C/X SAR	Micro-ondes (radar)

La consultation de notre groupe d'experts nous a permis de nous maintenir dans la ligne de conduite suggérée par Simos (1990). Certains critères ont été agrégés. Par exemple, dans le prix des images par unité de surface, nous avons tenu compte à la fois du prix de l'image brute et de la surface couverte par l'image. Nous avons éliminé certains critères comme la sensibilité du capteur à la couverture nuageuse. Nous comparons des

capteurs fonctionnant dans des bandes spectrales différentes. Les capteurs visibles et infra-rouges sont sensibles à la présence de nuages tandis que les capteurs hyperfréquences peuvent fonctionner de jour comme de nuit, indépendamment de la couche nuageuse. Nous aurions donc été confrontés à un critère de nature binomiale difficilement exploitable dans une telle analyse.

## 2. DÉFINITION DES CRITÈRES ET SENS DE L'OPTIMISATION

Pour les deux premiers critères, nous avons utilisé l'échelle naturelle des données alors que nous nous sommes servis d'une échelle de pointage pour les quatre autres. La partie suivante présente les échelles définies pour les différents critères et les performances obtenues par les capteurs pour ces critères. De plus, le sens de l'optimisation est présenté dans les différents tableaux descriptifs.

### 2.1 Prix des images

Tous les capteurs de l'étude sont susceptibles de fournir des données numérisées, pouvant être stockées sur ruban magnétique. Pour répondre aux différents besoins des utilisateurs, les agences de distribution sont en mesure de fournir des données brutes et des « produits à valeur ajoutée » contenant de l'information (Bonn et Rochon, 1993). Pour les fins de l'étude, nous n'avons considéré que le prix des images brutes distribuées par Radarsat International (prix de 1995) sauf pour NOAA et SSM/I où les chiffres nous ont été fournis par le Centre Canadien de Télédétection et Environnement Canada.

Pour des fins de comparaison, nous avons divisé le prix de l'image brute par la surface couverte par l'image (balayage). Ce critère a permis l'agrégation des critères prix et largeur de balayage.

Pour rendre l'analyse plus facile, nous avons établi le prix pour 100 km<sup>2</sup> de surface couverte. Dans le cas de SPOT 4, nous avons utilisé le prix actuel de SPOT 1-2 pour le capteur HRVIR (puisque'il est destiné à le remplacer) et le prix de AVHRR pour VÉGÉTATION (étant destiné à le concurrencer). Le prix de 100 km<sup>2</sup> de surface couverte pour le Convair est basé sur un parcours de 50 km effectué en 15 minutes (et sur sa meilleure largeur de balayage : 63 km). Notons que l'échelle de prix est très étendue, variant de quelques cents par 100 km<sup>2</sup> à un maximum de 75 \$ (tableau 2).

Capteur (plate-forme)	Prix de la scène brute (\$)	Largeur du balayage (km)	Prix (\$ par 100 km <sup>2</sup> )
TM (Landsat 4 et 5)	4950	185	15
HRV (Spot 1 et 2)	2700	60	75
HRVIR (Spot 4)	2700	60	75
VÉGÉTATION (Spot 4)	225	2200	0.0046
AVHRR (Noaa)	225	2700	0.003
SSM / I (Dmsp F-8)	225	1394	0.0116
AMI - SAR (Ers-1)	1375	100	13.7
SCANSAR 500 KM (Radarsat)	5400	500	2.16
STANDARD 100 KM (Radarsat)	4050	100	40.5
AIRBORNE C/X-SAR (Convair 580)	5000 \$ / HEURE	63	40

## 2.2 Fréquence des mesures ou répétitivité

La répétitivité d'un satellite est la fréquence de passage de la plate-forme au-dessus du même point du globe (en nombre de jours) et doit être la plus petite possible.

L'échelle de répétitivité est très étendue (tableau 3). De quatre mesures par jour pour NOAA, on passe à une image aux 3 jours pour

RADARSAT (mode SCANSAR 500 km) et à une image aux 35 jours pour ERS-1. SPOT, dont la répétitivité est normalement de 26 jours est cependant un cas particulier, comme nous le verrons dans la description du prochain critère.

**Tableau 3 : Fréquence des mesures. Critère à minimiser**

Capteur (plate-forme)	Répétitivité (jours)	Capteur (plate-forme)	Répétitivité (jours)
TM (Landsat 4 et 5)	16	SSM / 1 (Dmsp F-8)	1
HRV (Spot 1 et 2)	26	AMI - SAR (Ers-1)	35
HRVIR (Spot 4)	26	SCANSAR 500 KM (Radarsat)	3
VÉGÉTATION (Spot 4)	26	STANDARD 100 km (Radarsat)	24
AVHRR (Noaa)	0.25*	AIRBORNE C/X-SAR (Convair 580)	1**

\* 4 fois par jour

\*\* on suppose que l'aéronef, basé à Ottawa, peut se rendre à la Baie James et prendre ses mesures au cours d'une même journée.

## 2.3 La flexibilité opérationnelle du capteur

La répétitivité revêt une certaine importance pour des applications étudiant des phénomènes en évolution rapide comme, par exemple, la fonte des neiges. La répétitivité aux 26 jours de SPOT peut être compensée par une capacité d'ajustement programmable de ses capteurs. Pour des observations verticales, les passes successives se font à des intervalles de 26 jours, mais en raison de la capacité des capteurs de prendre des prises de vue obliques, des images successives peuvent être prises, en moyenne, à 2 jours 1/2 d'intervalle (cette répétitivité varie cependant avec la latitude). Toutefois, l'accroissement de la répétitivité par orientation du capteur se fait au détriment de certains secteurs qui ne seront pas couverts.

En mode nadir, les 2 capteurs sont orientés de manière à couvrir des segments adjacents.

Puisque que les 2 fauchées se recoupent de 3 km, la fauchée totale est de 117 km. En mode off-nadir, la fauchée peut atteindre 950 km (centré sur la trace : trajectoire au sol du satellite). Quand SPOT utilise le mode off-nadir, la fauchée d'images individuelles varie de 60 à 80 km, dépendant de l'angle de prise de vues. La même région peut être photographiée de manière différente, permettant ainsi d'obtenir des prises de vue stéréoscopiques. Donc, la même région peut être imagée plus fréquemment sans avoir à attendre une passe à la verticale de la région visée (Bonn et Rochon, 1993).

RADARSAT offre également une possibilité d'ajustement des faisceaux. Le RSO de RADARSAT (radar à synthèse d'ouverture) se caractérise par la capacité d'orienter son faisceau sur une plage de 500 km donnant ainsi accès à une vaste gamme de modes et de positions d'exploitation, de largeurs de fauchées comprises entre 50 et 500 km et de résolutions allant

de 10 à 100 mètres. Ses angles d'incidence varient également de 10 à 60 degrés (Agence Spatiale Canadienne, 1995).

Dans le cas de la plateforme aéroportée (CONVAIR 580), il est possible d'ajuster la trajectoire de vol pour obtenir les images désirées.

Nous avons construit l'échelle de flexibilité (tableau 4) en utilisant la méthode de pointage suivante :

1. Meilleure possibilité : ajustement de la ligne de vol : 4 points;
2. Capacité d'ajustement du faisceau : 3 points;
3. Possibilité d'orientation des capteurs : 2 points;
4. Aucune possibilité d'orienter les capteurs ou de modifier l'angle d'incidence comme c'est le cas pour la plupart des capteurs suivant une orbite fixe : 1 point

Capteur (plate-forme)	Flexibilité (pointage)	Capteur (plate-forme)	Flexibilité (pointage)
TM (Landsat 4 et 5)	1	SSM / I (Dmsp F-8)	1
HRV (Spot 1 et 2)	2	AMI - SAR (Ers-1)	1
HRVIR (Spot 4)	2	SCANSAR 500 KM (Radarsat)	3
VÉGÉTATION (Spot 4)	1	STANDARD 100 KM (Radarsat)	3
AVHRR (Noaa)	1	AIRBORNE C/X-SAR (Convair 580)	4

#### 2.4 Situation opérationnelle du capteur

Dans ce critère, le meilleur pointage revient aux capteurs qui sont actuellement en service et qui fournissent régulièrement des données numériques. SPOT 4 avec ses capteurs VÉGÉTATION et HRVIR doit être lancé en 1997 .

RADARSAT a été lancé le 4 novembre 1995. Lancement et déploiement des différentes antennes se sont déroulés de façon normale mais nous attendons les premières images pour le début de 1996. Nous avons également tenu compte de la situation spéciale dans laquelle se trouvait le CONVAIR 580 du CCT , opérationnel mais remisé pour des raisons « budgétaires ».

L'échelle de pointage est la suivante :

1. Capteur opérationnel : 4 points;
2. Capteur opérationnel mais remisé pour des considérations budgétaires et politiques (la remise en service étant incertaine) : 3 points;
3. Capteur assujetti à un satellite dont le lancement (récent) s'est bien déroulé mais qui n'a pas encore fourni de données exploitables: 2 points.
4. Capteur dont la plate-forme doit être mise en service dans un proche avenir : 1 point.

Tableau 5 : Situation opérationnelle du capteur. Critère à maximiser			
Capteur (plate-forme)	Situation opérationnelle	Capteur (plate-forme)	Situation opérationnelle
TM (Landsat 4 et 5)	4	SSM / I (Dmsp F-8)	4
HRV (Spot 1 et 2)	4	AMI - SAR (Ers-1)	4
HRVIR (Spot 4)	1	SCANSAR 500 KM (Radarsat)	2
VÉGÉTATION (Spot 4)	1	STANDARD 100 KM (Radarsat)	2
AVHRR (Noaa)	4	AIRBORNE C/X-SAR (Convair 580)	3

## 2.5 Polyvalence du capteur

Il s'agit du nombre d'informations sur le couvert nival fournies par un même capteur. La capacité de mesurer ces paramètres est liée à la portion du spectre électromagnétique dans laquelle il fonctionne. Les mesures les plus pertinentes sont les suivantes :

### 1) *Distribution spatiale de la couverture de neige.*

Nous nous attachons à la faculté qu'a le capteur de discerner ou non la présence de neige sur le sol (neige / non neige). Cette mesure intéresse directement les gens d'Hydro-Québec, car elle permet de savoir où en est le processus de fonte en différents points du territoire.

### 2) *Distribution spatiale de la couverture de neige humide.*

La discrimination basée sur la consistance de la neige (neige sèche et neige humide) permet aussi de savoir où en est le processus de fonte en différents points du territoire.

### 3) *Équivalent en eau de la neige*

Cette mesure est au cœur de toute la problématique de la neige. Il s'agit de la mesure du « rendement » en eau du couvert de neige, ce rendement dépendant

à la fois de la hauteur de la couche de neige et de sa densité. Les prévisionnistes désirent la mesure la plus précise possible.

Notre échelle de pointage tient compte de l'importance relative de ces trois mesures.

1. Distribution spatiale de la couverture de neige : 1 point;
2. Distribution spatiale de la neige humide : 1 point;
3. Équivalent en eau de la neige : 2 points

Tableau 6 : Polyvalence du capteur. Critère à maximiser					
Capteur (plate-forme)	Mesures possibles	Pointage	Capteur (plate-forme)	Mesures possibles	Pointage
TM (Landsat 4 et 5)	1-2	2	SSM / I (Dmsp F-8)	1-3	3
HRV (Spot 1 et 2)	1	1	AMI - SAR (Ers-1)	2-3*	3
HRVIR (Spot 4)	1	1	SCANSAR 500 KM (Radarsat)	2-3*	3
VÉGÉTATION (Spot 4)	1	1	STANDARD 100 KM (Radarsat)	2-3*	3
AVHRR (Noaa)	1-2	2	AIRBORNE C/X-SAR (Convair 580)	2-3*	3

\* sous certaines conditions seulement.

## 2.6 La note politique relative à l'utilisation de capteurs spécifiques

Il ne s'agit pas ici de faire de discrimination entre les différents pays impliqués dans les programmes spatiaux. L'étude serait cependant incomplète si elle se permettait d'ignorer l'importance de l'origine du capteur lorsque des contributions financières ou des programmes de coopération technique sont en jeu.

Plusieurs provinces ont contribué financièrement au projet canadien RADARSAT (un projet de plus d'un demi-milliard de dollars CAN). Le Québec, pour sa part, a investi quelque 32 millions de dollars CAN dans le projet. La présence toute proche de nos voisins du Sud permet de profiter de leur expertise dans le domaine spatial et d'obtenir des images à moindre coût. Il est également nécessaire de tenir compte de certains projets de coopération, principalement avec les européens. De manière plus marquée que les autres, ce critère politique fait appel à la compétence d'experts pour ôter toute note subjective pouvant s'y glisser.

L'échelle de pointage a permis l'agrégation de ces différents facteurs :

1. Capteur canadien avec contribution financière du Québec : 5 points;
2. Capteur canadien sans contribution financière du Québec : 4 points;
3. Capteur américain : 3 points;
4. Capteur européen faisant l'objet de projets de coopération avec des organismes canadiens : 2 points;
5. Capteur européen ne faisant pas l'objet de projets de coopération avec des organismes canadiens : 1 point.



Tableau 7 : Note politique. Critère à maximiser						
Capteur (plate-forme)	Origine	Pointage	Capteur (plate-forme)	Origine	Pointage	
TM (Landsat 4 et 5)	ÉTATS-UNIS	3	SSM / I (Dmsp F-8)	ÉTATS-UNIS	3	
HRV (Spot 1 et 2)	FRANCE	1	AMI - SAR (Ers-1)	ESA*	2	
HRVIR (Spot 4)	FRANCE	1	SCANSAR 500 KM (Radarsat)	CANADA	5	
VÉGÉTATION (Spot 4)	FRANCE	1	STANDARD 100 KM (Radarsat)	CANADA	5	
AVHRR (Noaa)	ÉTATS-UNIS	3	AIRBORNE C/X-SAR (Convair 580)	CANADA	4	

\* Collaboration européenne.

### 3. LA MÉTHODE MULTICRITÈRE UTILISÉE

#### 3.1 Justification du choix de la méthode PROMÉTHÉE II

L'objectif principal de cette étude consiste à établir un rangement entre différents capteurs satellitaires et aéroportés de suivi du couvert nival. Le caractère conflictuel et multidimensionnel des critères considérés justifie pleinement l'utilisation d'une méthode d'analyse multicritère. De plus, la méthode multicritère utilisée doit refléter pleinement l'intégration des préférences des décideurs, et ce de manière interactive tout au long du processus de décision.

Notre choix s'est porté vers PROMÉTHÉE II, issue de la famille des méthodes PROMETHEE (Preference Ranking Organization Methods for Enrichment Evaluation) mises au point par Brans *et al.* (1984). L'objectif des auteurs était de développer des méthodes simples et facilement compréhensibles, en conservant cependant certains concepts importants au niveau des divers types de critères. Nous ne voulions pas, dans le cadre de cette analyse, introduire une possibilité de veto sur une action par l'évaluation d'un seul critère. Dans PROMETHEE, la considération de vrais critères peut diminuer l'appréciation globale d'une action sans toutefois la déclasser complètement. [H1]

#### 3.2 Application de la méthode PROMÉTHÉE II

PROMÉTHÉE introduit une fonction (*critère généralisé*) exprimant la « préférence du décideur » pour une action *a* par rapport à une action *b*. Cette fonction, variant entre 0 et 1, est définie séparément pour chaque critère *j*

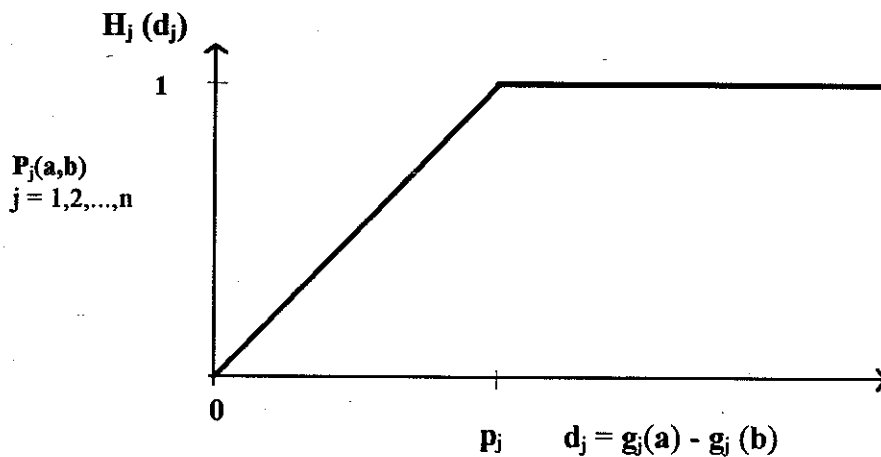
$$P_j(a,b) = \begin{cases} 0 & \text{si } g_j(a) \leq g_j(b) \\ H_j(d_j) & \text{si } g_j(a) > g_j(b) \end{cases}$$

où  $d_j = g_j(a) - g_j(b)$  : différence entre deux évaluations.

Le logiciel calcule un indicateur de préférence global pour chaque critère *j*:

$$P(a, b) = \sum_{j=1}^n \Pi_j P_j(a, b)$$

où  $\Pi_j$  est la pondération accordée au critère considéré.



**Figure 2:** Exemple de fonction de critère linéaire conduisant à une préférence stricte sur un critère.

PROMÉTHÉE II donne un préordre total basé sur un bilan de flux  $\Phi(a)$  qui tient compte :

1) du flux sortant :  $\Phi^+(a) = \sum_{b \in A, b \neq a} P(a,b)$  et

2) du flux entrant :  $\Phi^-(a) = \sum_{b \in A, b \neq a} P(b,a)$

$$\Phi(a) = \Phi^+(a) - \Phi^-(a)$$

On peut conclure que :

aPb (a préférée à b) si  $\Phi(a) > \Phi(b)$

ou que aIb (a indifférent à b) si  $\Phi(a) = \Phi(b)$

Le rangement final des capteurs correspond au classement des bilans de flux par ordre décroissant.

#### 4. RÉSULTATS:

##### 4.1 Détermination des poids des critères

Pour fixer les pondérations des différents critères, nous avons fait une enquête auprès de cinq (5) experts en télédétection du couvert nival et utilisé la méthodologie de Simos (1990). Cette méthode

simple et facilement compréhensible pour les répondants se base sur le classement des critères par ordre décroissant des préférences avec possibilité d'ex aequo ainsi que d'espacement dans le classement. Pour chaque répondant, nous avons obtenu un jeu de 6 poids de critères et agrégé l'information en calculant la moyenne des poids pour chaque critère. Même si cette méthode n'est pas la meilleure façon de faire dans toutes les situations, nous considérons que l'agrégation est acceptable si nous considérons les similitudes des jugements des experts.

##### 4.2 Explicitation des fonctions de critères

Pour identifier les différentes fonctions de critères, nous nous sommes basés sur l'avis de spécialistes et nous n'avons retenu que celles qui nous paraissaient les plus pertinentes pour les fins de l'étude. Cette procédure nous a permis de minimiser le nombre de fonctions utilisées.

a) pour le critère « prix des images », nous avons choisi une fonction de type V à préférence linéaire avec zone d'indifférence (figure 2a). La zone d'indifférence se situe entre 0 et 0.01\$ par 100 km<sup>2</sup>. Dans cette zone d'indifférence faible se retrouvent les paires de capteurs dont le prix des images est très bas et pour lesquels la différence exerce peu d'influence

sur le choix des décideurs. La grandeur du territoire impliquant un coût élevé d'acquisition des images, nous avons fixé le seuil de préférence stricte (p) à 10\$ par 100 km<sup>2</sup>.

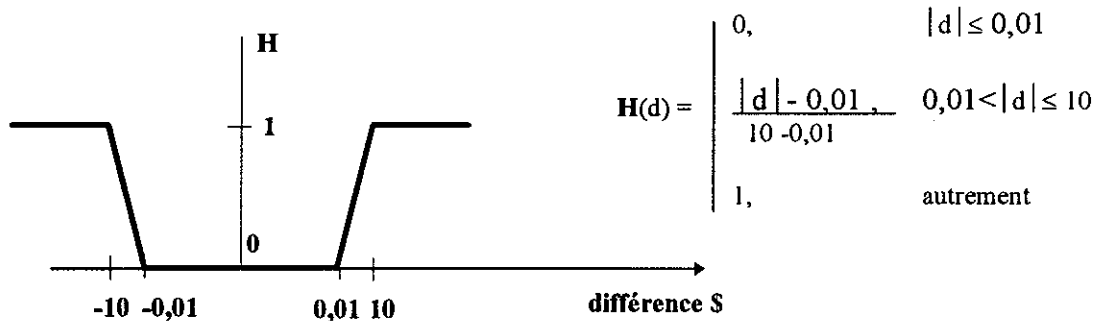
b) pour le critère « fréquence des mesures », une fonction en escalier (type IV) marquant l'indifférence (0), la préférence faible (0.5) et la préférence stricte (1) nous a semblé souhaitable (figure 2b). L'étendue des échelles de mesure a orienté le choix dans ce sens. Les seuils de préférence stricte (p) et d'indifférence (q) ont été fixés respectivement à 10 et 8 jours.

c) les critères « situation opérationnelle » et le critère « note politique » présentent de petites échelles de

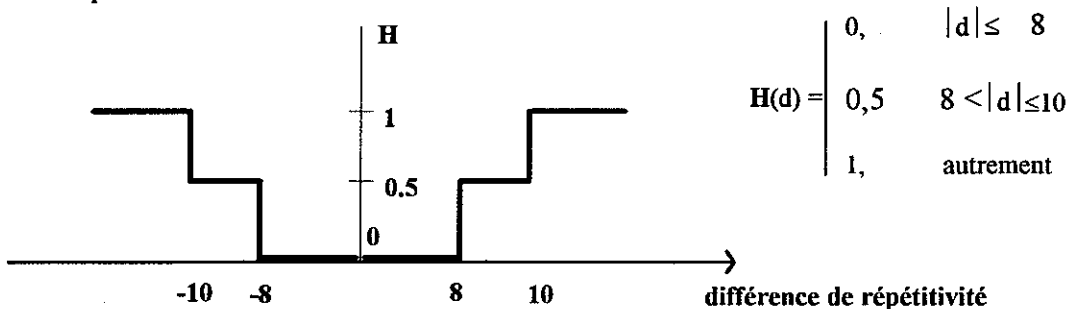
valeurs (1 à 4 et 1 à 5). Nous avons choisi une fonction en escalier de type IV et exprimé une préférence stricte entre deux capteurs dont la différence entre leur performance est de 2 intervalles (figure 2c). Entre 0 et 1, nous n'exprimons qu'une préférence faible (0.5)

d) pour les critères « flexibilité opérationnelle » et le critère « polyvalence », nous considérons qu'une différence de performance entre deux capteurs est très importante. Nous avons donc choisi une fonction de type vrai critère (considération de type veto) permettant de marquer une préférence stricte aussitôt qu'une différence de performance entre deux capteurs est perçue dans l'évaluation de ces critères (figure 2d).

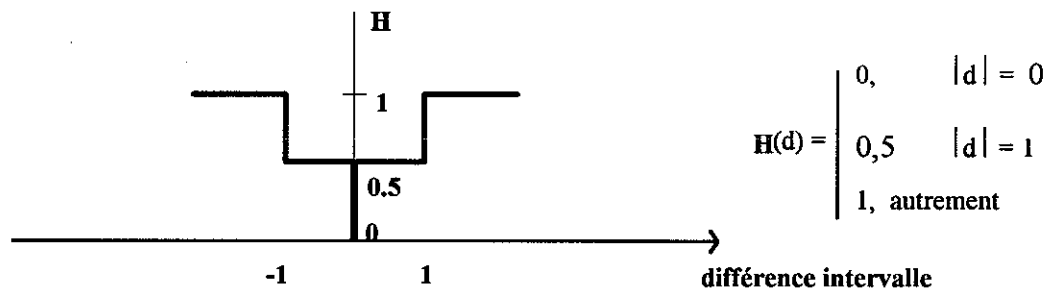
a. «Prix des images»



b. «Fréquence des mesures»



c. «Situation opérationnelle» et «note politique»



d. «Flexibilité opérationnelle et «polyvalence»



Figure 3 : Explication des fonctions de critères

4.3 Résultat du classement

Le tableau 8 présente trois rangements des capteurs satellitaires et aéroportés. Dans un premier temps, nous avons établi un classement en utilisant les pondérations obtenues par l'enquête auprès des experts. Afin de vérifier la robustesse de ce premier rangement, nous avons effectué deux tests de

sensibilité sur cette première analyse. Tout d'abord, nous avons examiné l'analyse de sensibilité intégrée au logiciel. La figure 3 montre les intervalles à l'intérieur desquels peuvent varier les pondérations sans affecter le rangement final.

**Tableau 8 : Rangements obtenus pour trois analyses différentes**

Rangement	Première analyse (poids des critères selon enquête)	Seconde analyse (poids des critères égaux)	Troisième analyse (sans le capteur AIR C/X- SAR)
1	RS-SCANSAR	RS-SCANSAR	RS-SCANSAR
2	SSM/I	AIR C/X-SAR	SSM/I
3	AIR C/X-SAR	SSM/I	AVHRR
4	AVHRR	AVHRR	RS-STANDARD
5	RS-STANDARD	RS-STANDARD	TM
6	TM	TM	AMI-SAR
7	AMI-SAR	AMI-SAR	VÉGÉTATION
8	VÉGÉTATION	HRV	HRV
9	HRV	VÉGÉTATION	HRVIR
10	HRVIR	HRVIR	

WEIGHTS STABILITY INTERVALS

Criterion	Weight	Interval
C 1 prix	0.26	[ 0.19, 0.29]
C 2 repetivi	0.20	[ 0.18, 0.63]
C 3 flexibi	0.15	[ 0.13, 0.22]
C 4 operation	0.15	[ 0.00, 0.20]
C 5 polyva	0.18	[ 0.14, 0.20]
C 6 notepol	0.06	[ 0.04, 0.33]

**Figure 4 : analyse de sensibilité pour le premier rangement.**

Étant donné l'incertitude reliée au paramètre de préférence stricte (p) dans le critère « prix des images », nous avons, par la suite, fait varier ce paramètre de plus ou moins 5%. Dans un sens comme dans l'autre, le rangement reste identique.

Dans un deuxième temps, nous avons établi un rangement avec des pondérations égales (0.17) pour chaque critère. Le rangement obtenu est représenté dans la seconde colonne du tableau. Ce rangement ne diffère pas beaucoup du rangement

initial (seulement deux inversions : AIR C-X SAR et SSM / I, d'une part, HRV et VÉGÉTATION, d'autre part). Dans notre cas, nous ne pouvons conclure que la pondération est un élément essentiel au sein de cette analyse multicritère.

Un troisième rangement a été effectué en ôtant l'une des actions. C'est ainsi que nous avons retiré le capteur AIRBORNE C/X SAR de l'analyse, étant donné le statut opérationnel précaire de sa plate-forme de support (CONVAIR 580 du CCT). Le rangement obtenu est semblable au rangement initial pour les autres actions. Nous tenons à

rappeler que les résultats obtenus, compte tenu de l'échelle de pointage utilisée pour le critère 6 (note politique), seraient sans doute différents pour un gestionnaire non québécois. Ultérieurement, nous élargirons le cadre d'analyse afin de donner à l'étude une envergure internationale.

Les quelques remarques qui suivent tirent parti du premier rangement obtenu. En premier lieu, nous pouvons remarquer que les capteurs hyperfréquences y occupent les premières places. RADARSAT avec son mode SCANSAR 500 KM se classe en tête de liste suivi de SSM/I et de AIRBORNE C/X-SAR installé sur le Convair. RADARSAT revient au cinquième rang avec le mode STANDARD 100 KM, ce qui en fait un capteur potentiellement très intéressant. L'analyse a relégué la plupart des capteurs du visible et de l'infra-rouge en bas de liste et ce sans faire intervenir un critère qui aurait pu nuire considérablement à leur évaluation : leur sensibilité à la couverture nuageuse.

## 5. CONCLUSION

En premier lieu, nous avons pu apprécier, en tant qu'analystes, la souplesse d'utilisation de PROMÉTHÉE II. Cette méthode permet de maintenir une interaction constante avec les décideurs, de modifier au besoin certains critères, de faire varier le nombre d'actions ou de ré-évaluer les pondérations lorsque nécessaire. A l'aide de cette méthode souple et non discriminante, nous croyons avoir établi des rangements compréhensibles qui suivent la logique du décideur.

Il ne faut cependant pas perdre de vue que l'analyse multicritère est une méthode d'aide à la décision et qu'il ne faut pas accorder une confiance aveugle aux résultats obtenus. Cette première analyse est un cadre analytique qu'il faudra par la suite, améliorer pour suivre l'évolution temporelle de certains critères comme le prix des images (qui serait censé diminuer pour certains capteurs) et la situation opérationnelle des capteurs.

Nous suggérons cependant, pour une analyse ultérieure, d'employer une enquête de type DELPHI,

avec plusieurs rondes de questionnaires, pour fixer les pondérations. Cette procédure permettrait d'éviter d'avoir recours à une moyenne arithmétique qui peut nuire considérablement à la qualité de l'information recueillie.

L'analyse a permis de faire ressortir le potentiel immense des capteurs hyperfréquences pour le suivi du couvert nival, ce qui ne nous permet toutefois pas de conclure à la désuétude des capteurs visibles et infra rouges.

A notre avis, cette analyse multicritère présente deux avantages importants : en premier lieu, d'obtenir, d'un rapide coup d'oeil, un aperçu du potentiel des capteurs retenus pour l'analyse mais également de permettre, par la suite, d'élaborer des scénarios de mesure tirant profit du rangement et de la complémentarité entre les capteurs. La littérature fait fréquemment mention de cette complémentarité sans toutefois s'attarder sur une méthode pouvant faciliter le jumelage entre capteurs. Sans offrir de réponse définitive à ce problème, nous sommes en mesure, avec le rangement obtenu par PROMÉTHÉE de fournir des éléments de solution.

## 6. REMERCIEMENTS

Je tiens tout d'abord à remercier M. J-M Martel, professeur à l'Université Laval pour les conseils prodigués lors de la réalisation de cette étude. Je tiens également à remercier M. François Paquet, étudiant au MBA à l'Université Laval pour sa collaboration exceptionnelle à la partie de l'étude couvrant l'analyse multicritère. Je remercie également l'équipe d'hydrologie à INRS-Eau qui a bien voulu se prêter à l'enquête destinée à pondérer les critères et en particulier Mme Monique Bernier, mon directeur de thèse, pour ses précieux conseils sur le choix des critères. Mes remerciements vont également à M. J-L. Sasseville, mon codirecteur, pour son support technique et ses encouragements permanents dans la réalisation de mes projets.

## 7. RÉFÉRENCES

AGENCE SPATIALE CANADIENNE (1995), *Radarsat, Ministre des Approvisionnements et Services Canada, catalogue ST-95-4/4-1995F*

BONN, F et ROCHON, G., 1993, *Précis de Télédétection*, Presses de l'Université du Québec, 485 pages.

BRANS, J.P., MARESCHAL, B., VINCKE, Ph. (1984), 'PROMETHEE : A new family of Outranking Methods in Multicriteria Analysis,' In J.P. Brans (ed.), *Operational Research '84*, North-Holland, Amsterdam, p.477-490.

CASTRUCCIO, P.A., LOATS, H.L., LLOYD, D., PIXIE, A., NEWMAN, B. (1980). Cost-benefit analysis for the operational applications of satellite snowcover observations (Oasso). Workshop on Operational Applications of Satellite Snowcover Observations Operations. *Proc. of a final workshop held in Sparks, Nevada, April 16-17, 1979, Scientific and Technical Information Office, NASA Conf. Publ. 2116*, p. 239-253.

HYDRO-QUÉBEC, *Rapport annuel 1994*, 84 pages.  
RADARSAT INTERNATIONAL (1995), *Price list canadian - World wide products and services (effective august 1995)*.

SCHÄRLIG, A. (1985), *Décider sur plusieurs critères. Panorama de l'aide à la décision multicritère*, Presses polytechniques et universitaires romandes, 304 pages.

SIMOS, J. (1986), *Les méthodes Electre*; polycopié IGE, EPFL, Lausanne, 137 pages.

SIMOS, J. (1990), *Évaluer l'impact sur l'environnement*, Presses Polytechniques et Universitaires Romandes, 261 pages.

SOCIÉTÉ D'ÉNERGIE DE LA BAIE JAMES (1987), *Le complexe hydroélectrique de la Grande Rivière*, SEBJ, 496 pages.

YEH, W-G., BECKER, L., ZETTLEMOYER, R. (1978), Information requirements for improving hydropower, *Journal of the Water Resources Planning and Management Division*, november 1978, pp.139-156

