

**Optimisation du nombre de
sites d'entreposage de
poteaux chez Hydro-Québec**

L. Garneau, A. Langevin,
D. Riopel, N. Marcoux

G-2005-10

Février 2005

Les textes publiés dans la série des rapports de recherche HEC n'engagent que la responsabilité de leurs auteurs. La publication de ces rapports de recherche bénéficie d'une subvention du Fonds québécois de la recherche sur la nature et les technologies.

Optimisation du nombre de sites d'entreposage de poteaux chez Hydro-Québec

Louis Garneau

André Langevin*

Diane Riopel*

Nathalie Marcoux

Département de mathématiques et de génie industriel

École Polytechnique de Montréal

C.P. 6079, Succ. Centre-ville

Montréal (Québec) Canada H3C 3A7

{louis.garneau, andre.langevin, diane.riopel, nathalie.marcoux}@polymtl.ca

* *et GERAD*

Février 2005

Les Cahiers du GERAD

G-2005-10

Copyright © 2005 GERAD

Résumé

La localisation d'un site d'approvisionnement pour minimiser les coûts d'opérations est une problématique industrielle courante. Les variables classiques considérées sont les coûts de transport et d'entreposage. La complexité de ce problème augmente lorsque des contraintes sont ajoutées : localisation multisite avec décision d'ouverture/fermeture de sites, affectation sectorielle à un site particulier, coûts de protection des sites, prévision de la demande et réseau routier prédéterminé. Un outil informatique d'aide à la décision, incluant un modèle mathématique, est proposé pour la sélection de sites d'approvisionnement. Une étude de cas, avec un total de 13 scénarios étudiés, est présentée pour l'optimisation de l'approvisionnement des poteaux pour un territoire donné chez Hydro-Québec. Basée sur des tests numériques, une discussion inclut une analyse de sensibilité.

Mots clés : Outils d'aide à la décision, localisation multisites, approvisionnement, distribution, réseau routier.

Abstract

The storage site location with the minimisation of operating costs is a common industrial issue. Transportation and storage costs are the usual variables considered. The problem complexity is enhanced when adding constraints such as: multisite location with site opening/closing decisions, zoning allocation constraints, site protection costs, demand forecasts, and actual road network. A computerized decision support tool, containing a mathematical model, is developed for the selection of storage sites. A case study, with 13 proposed scenarios, addresses the optimization of supply of posts at Hydro-Quebec for a given territory. Based on numerical tests, a discussion includes a sensitivity analysis.

Key Words: Decision support tool, multisite location, supplying, distribution, road network.

Remerciements : Ces travaux ont été en partie financés par Hydro-Québec, le Fonds québécois de recherche sur la nature et les technologies (FQRNT) et le Conseil de recherches en sciences naturelles et en génie du Canada (CRSNG).

1 Introduction

Suite à de nouvelles normes environnementales, la gestion et l'opération des sites d'entreposage de poteaux chez Hydro-Québec risquent de devenir beaucoup plus coûteuses. À l'heure actuelle, il existe 67 sites d'entreposage de poteaux au Québec, dont 12 sites sur le territoire du Richelieu, territoire qui est à l'étude. Le présent article a pour but de présenter un outil d'aide à la décision permettant de faire la sélection de sites d'entreposage qui devraient être maintenus ouverts ou fermés, parmi un ensemble de sites déjà existants. La particularité de cet outil est la combinaison d'un modèle mathématique classique de localisation à un logiciel de cartographie permettant de considérer le réseau routier réel. Ainsi, un premier objectif est de développer un modèle mathématique pour représenter le plus fidèlement possible la situation des opérations d'Hydro-Québec. Un second objectif est de développer et de documenter un outil informatique d'aide à la décision, incorporant le modèle mathématique pour la sélection d'un nombre minimum de sites d'entreposage afin d'assurer un service satisfaisant auprès de la clientèle tout en permettant de minimiser les coûts d'opérations. Cet outil aidera les gestionnaires d'Hydro-Québec quant à la prise de décision de maintenir ouvert ou de fermer certains sites d'entreposage. Dans un premier temps, les opérations reliées aux poteaux sont décrites. Par la suite, la formulation du problème est présentée de même qu'une description de l'outil de calcul. Finalement, des scénarios sont étudiés et une analyse des résultats inclut une analyse de sensibilité de certains paramètres.

2 Logistique des poteaux

La figure 1 présente les trois opérations considérées : l'approvisionnement (\rightarrow), l'entreposage (∇) et la distribution des poteaux ($--\rightarrow$). Il y a actuellement 2 fournisseurs liés par contrat, 12 sites d'entreposage et 11 secteurs desservis sur le territoire du Richelieu. Par définition, un secteur est composé d'une ou plusieurs municipalités, une municipalité étant associée, au Québec, au regroupement de plusieurs villes voisines. Pour chaque secteur, le centre géographique (\square) est fonction de la demande de toutes les municipalités composant le secteur. Il est à noter que les coûts de ces trois opérations excluent les coûts de la gestion administrative (par exemple, les coûts de commandes et de l'émission de bons de commandes).

2.1 Approvisionnement

L'émission d'un bon de commandes mène à l'expédition par camion, à un certain coût, de poteaux en provenance d'un fournisseur à un site d'entreposage d'Hydro-Québec. Chaque fournisseur est lié par contrat à l'approvisionnement de sites spécifiques d'entreposage. Il n'est donc en aucun cas question de chercher quels sites seraient plus avantageux d'être desservis par tel ou tel fournisseur. En 2001, sur le territoire du Richelieu, près de 200 voyages par camion ont eu lieu entre les deux fournisseurs et les 12 sites d'entreposage.

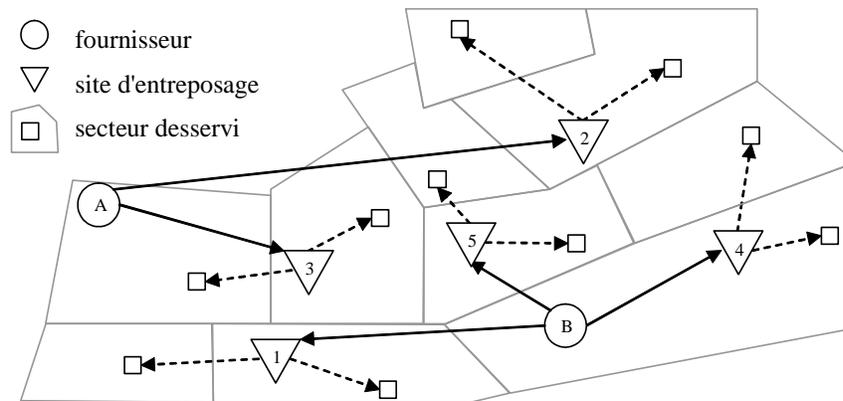


Figure 1 – Exemple schématique des liens interopérations

2.2 Entreposage

Les activités d'entreposage génèrent trois types de coûts :

- coûts d'entreposage : fonction du nombre de poteaux qui transitent sur chaque site annuellement ;
- coûts de protection du sol : les poteaux étant enduit d'une couche protectrice contre la pourriture du bois, les sols doivent être protégés pour éviter de contaminer l'environnement ; ce coût est variable en fonction de la consommation annuelle en poteaux ;
- coûts d'opération : incluant la récupération et le traitement des eaux contaminées.

De plus, Hydro-Québec a identifié une contrainte d'exclusion, basée sur des raisons administratives, qui doit être respectée : les sites d'entreposage de St-Hubert et de St-Bruno ne peuvent être ouverts simultanément.

2.3 Distribution

Selon les besoins, les poteaux sont acheminés par camion, à un certain coût, vers un chantier de plantation. Les coûts de distribution sont fonction du temps de transport entre un site d'entreposage et un chantier de plantation. À chaque site d'entreposage est associé un secteur de livraison. Les besoins des chantiers de plantation sont planifiés par secteur. Une particularité de l'outil d'aide à la décision proposé est que les calculs des temps de déplacements sont basés sur le réseau routier réel. Il y a fusion de secteurs lorsqu'il y a une réaffectation d'un secteur à un site d'entreposage déjà utilisé par un ou plusieurs autres secteurs. Dans ce cas, la distance moyenne doit être réévaluée en considérant les données des municipalités de chacun des secteurs impliqués. Les figures 2a), 2b) et 2c) présentent un exemple de l'impact de la fusion de secteurs sur les calculs des temps de transport. Les t_{ij} représentent le temps de transport pour se déplacer, en suivant les routes, entre un site d'entreposage j et un centre géographique du secteur i , ou de la municipalité Ki . La

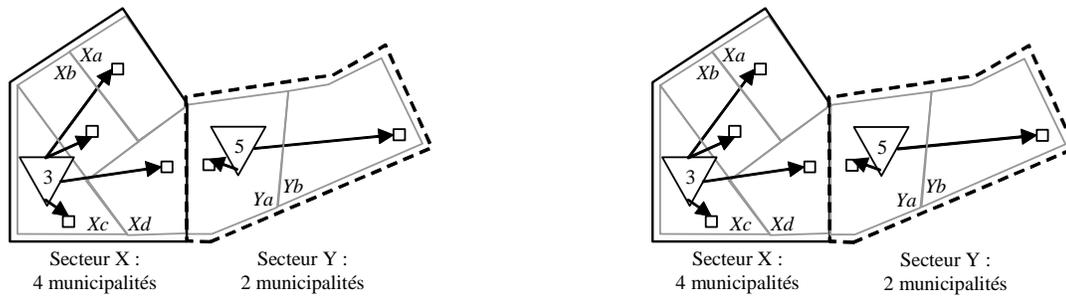
figure 2a) présente les équations de calcul du temps de transport par secteur (secteurs X et Y). La figure 2b) présente une équation du temps de transport par secteur avec pondération permettant de minimiser le biais associé à la fréquence f_i de visites de chacune des municipalités composant un secteur donné. La figure 2c) présente la révision des calculs lors de la fusion de deux secteurs, due à la fermeture d'un site d'entreposage.

3 Formulation du problème

Le problème d'optimisation de l'approvisionnement et de la distribution des poteaux est formulé comme un *problème de localisation avec coûts fixes* (Balinski, 1965) mais exige des contraintes supplémentaires pour l'exclusion mutuelle de certains sites. Le tableau 1 présente les variables et paramètres associés au modèle.

Tableau 1 – Variables et paramètres du modèle

Variables de décisions	
X_{ij}	: 1 si le secteur i est affecté au site j et 0 sinon
Z_j	: 1 si le site j est en fonction et 0 sinon
Paramètres d'opérations	
R_i	: Nombre de réceptions quotidiennes de poteaux pour le site i
T_j	: Temps moyen de transport entre un fournisseur et le site d'entreposage j en minutes
FF	: Temps fixe de transport entre un fournisseur et un site d'entreposage en minutes (chargement, déchargement, paperasse)
SQ_i	: Nombre de sorties quotidiennes de poteaux pour le site d'entreposage i
t_{ij}	: Temps moyen de transport entre un site d'entreposage j et un secteur i en minutes
FS	: Temps fixe de transport entre un site d'entreposage et un chantier de plantage en minutes (chargement, déchargement, paperasse)
Paramètres de coûts	
CF	: Coût de transport entre un fournisseur et un site d'entreposage en \$/minute
CS	: Coût de transport entre un site d'entreposage et un chantier de plantage en \$/minute
CI_j	: Coût d'entreposage au site d'entreposage j en \$
CP_j	: Coût de protection au site d'entreposage j en \$
CO_j	: Coût d'opération au site d'entreposage j en \$
CT	: Coût total en \$



$$t_{X3} = \frac{t_{Xa3} + t_{Xb3} + t_{Xc3} + t_{Xd3}}{4}$$

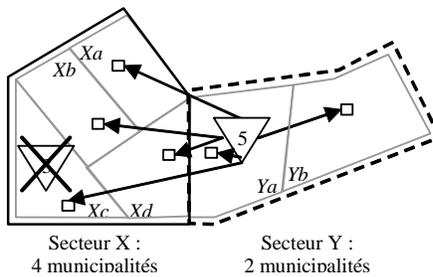
$$t_{Y5} = \frac{t_{Ya5} + t_{Yb5}}{2}$$

2a) Calcul par municipalité

$$t_{X3} = \frac{t_{Xa3} \times f_{Xa} + t_{Xb3} \times f_{Xb} + t_{Xc3} \times f_{Xc} + t_{Xd3} \times f_{Xd}}{\sum_i f_i}$$

$$t_{Y5} = \frac{t_{Ya5} \times f_{Ya} + t_{Yb5} \times f_{Yb}}{\sum_i f_i}$$

2b) Calcul avec pondération par municipalité



$$t_{X5} = \frac{t_{Xa5} + t_{Xb5} + t_{Xc5} + t_{Xd5}}{4}$$

$$t_{Y5} = \frac{t_{Ya5} + t_{Yb5}}{2}$$

$$t_{(XY)5} = \frac{t_{X5} \times f_X + t_{Y5} \times f_Y}{f_X + f_Y}$$

2c) Calcul pour une fusion de secteurs

Figure 2 – Exemple de calcul des temps de transport

3.1 Modèle mathématique

$$\begin{aligned}
 \text{MIN CT} &= C_{\text{approvisionnement}} + C_{\text{distribution}} + C_{\text{utilisation}} \\
 &= \sum_i \sum_j R_i \times (T_j + FF) \times CF \times X_{ij} + \sum_i \sum_j SQ_i \times (T_{ij} + FS) \times CS \times X_{ij} \\
 &\quad + \sum_j (CI_j + CP_j + CO_j) \times Z_j
 \end{aligned}$$

Sous les contraintes :

$$\begin{aligned}
 \sum_j X_{ij} &= 1 \quad \forall i && \text{affectation d'un secteur à un seul site} \\
 X_{ij} &\leq Z_j \quad \forall i, j && \text{affectation d'un secteur à un site ouvert} \\
 Z_j + Z_{j'} &\leq 1 \quad \text{où } j \neq j' && \text{exclusion mutuelle de certains sites} \\
 X_{ij} &\geq 0 \quad \forall i, j, Z_j \text{ binaire } \forall j &&
 \end{aligned}$$

3.2 Limites et hypothèses du modèle

1. Les vitesses de transport utilisées sur les autoroutes, les routes, les rues principales et les rues secondaires sont respectivement de 100, 90, 50 et 30 km/h. Le réseau routier réel est utilisé et les délais dus à la densité de circulation sont exclus des calculs.
2. L'affectation des fournisseurs aux sites est régie par contrat et n'est pas pris en compte dans cette étude.
3. Pour la distribution, la distance moyenne (temps moyen de transport) pour atteindre le centre géographique de chaque municipalité constituant le secteur est utilisée;
4. La fermeture d'un site implique l'annulation des frais d'entreposage.
5. Une capacité infinie d'entreposage aux sites est considérée.
6. Le modèle ne considère pas :
 - les économies d'échelle sur l'approvisionnement ;
 - l'actualisation de débours pour les coûts de protection des sites d'entreposage ;
 - les économies potentielles suite à la réutilisation des espaces d'entreposage "libérés" par une décision de fermeture ;
 - les impacts de l'augmentation du nombre d'entrées/sorties de poteaux aux sites d'entreposage ;
 - les impacts de la réduction du nombre de sites d'entreposage ou la fusion de secteurs sur les coûts de transport (nombre d'arrêts, distance et temps entre les arrêts, etc.).

Une collecte d'informations a permis d'établir les valeurs de divers paramètres (Annexe A).

4 Outil de calcul

Le logiciel de cartographie MapPoint [MICROSOFT] est utilisé pour évaluer les distances et les temps de transport. Les résultats sont transférés dans un fichier de calcul d'Excel [MICROSOFT] duquel le solveur est utilisé pour résoudre le modèle mathématique. L'interface est présentée en 6 écrans :

Les données :

1. Par site, estimation des stocks, des paramètres d'opération et de sorties de poteaux : coûts d'entreposage CI_j , coûts de protection et amortissement (pour CP_j), coûts d'opération CO_j , nombre de réceptions quotidiennes R_i et nombre de sorties quotidiennes SQ_i ;
2. Estimation des coûts de transport : coûts fixes FF et FS , et coûts variables CF et CS ;

Les calculs :

3. Calcul des distances et temps de transport T_j (Approvisionnement) : données générées par MapPoint ;
4. Calcul des distances et temps de transport t_{ij} (Distribution) : données générées par MapPoint ;

Les résultats :

5. Établissement des valeurs des variables X_{ij} et Z_j à l'aide du solveur d'Excel pour le modèle d'optimisation ;
6. Évaluation des coûts de la solution générée par types d'opérations (approvisionnement, entreposage et distribution).

5 Résultats et analyse

À l'heure actuelle, il existe 12 sites sur le territoire du Richelieu dont 11 sont en opération. En effet, au site de St-Hubert, il n'y a pas d'entreposage de poteaux. Les trois scénarios étudiés sont :

1. Ouverture de x sites d'entreposage, où $x = 11$ à 1, avec coûts de protection non nuls
2. Aucun coût d'opération et de protection, c'est-à-dire la situation actuelle
3. Sites d'entreposage ouverts par découpage de distribution en 3 zones :
 - Zone Pointe du Moulin/St-Jean : Valleyfield , Vaudreuil , Châteauguay, St-Jean
 - Zone Des Seigneuries/Des Cantons : St-Bruno , St-Hubert, Granby, Sherbrooke
 - Zone St-Hyacinthe/Bellerive : Sorel, St-Hyacinthe, Drummondville, Victoriaville

Le troisième scénario consiste à trouver quels sont les 3 sites qui devraient être ouverts à moindre coût pour couvrir chacune des zones. Pour ce faire, des contraintes sont ajoutées au modèle existant : 1- affectation des sites par zone et 2- obligation d'ouverture d'un et un seul site par zone.

Pour chacun des scénarios, les résultats sont synthétisés aux tableaux 2 et 3. Le tableau 2 présente la liste des sites ouverts par scénario. En ombragé sont les sites qui ne peuvent être ouverts simultanément. Le tableau 3 présente les coûts associés à chaque scénario et les économies par rapport à la situation actuelle.

L'analyse du tableau 3 démontre que les coûts d'utilisation des sites ainsi que les coûts d'approvisionnement diminuent de façon beaucoup plus importante que l'augmentation des coûts de distribution. La dernière colonne montre les économies potentielles si l'on passe séquentiellement de 11 sites à 1 site. Il devient clair qu'il est plus économique de fonctionner avec un nombre restreint de sites et d'accroître le transport routier que de répartir un grand nombre de sites sur l'ensemble du territoire.

Tableau 2 – Résultats – sites utilisés par scénario

Sc.	# sites ouverts	Valleyfield	Vaudreuil	Châteauguay	St-Hubert	St-Bruno	St-Jean	St-Hyacinthe	Granby	Sorel	Drummondville	Victoriaville	Sherbrooke
1	11	•	•	•		•	•	•	•	•	•	•	•
	10		•	•		•	•	•	•	•	•	•	•
	9		•	•		•	•		•	•	•	•	•
	8		•	•		•			•	•	•	•	•
	7			•		•			•	•	•	•	•
	6			•		•			•		•	•	•
	5		•			•			•			•	•
	4			•		•					•		•
	3			•		•					•		
	2					•					•		
1*						•							
2	7			•		•			•	•	•	•	•
3	3			•	•					•			

* : solution optimale

Tableau 3 – Résultats – décomposition des coûts par configuration

Sc.	# sites ouverts	Coûts annuels				
		Approv.	Utilisation	Distribution	Total	Économies
1	11	62 325 \$	642 058 \$	151 215 \$	855 598 \$	0 \$
	10	62 199 \$	582 648 \$	152 178 \$	797 025 \$	115 835 \$
	9	61 664 \$	523 494 \$	154 605 \$	739 763 \$	173 086 \$
	8	61 428 \$	464 395 \$	156 690 \$	682 512 \$	228 764 \$
	7	61 506 \$	406 237 \$	159 090 \$	626 834 \$	283 452 \$
	6	61 653 \$	349 637 \$	160 857 \$	572 146 \$	338 257 \$
	5	60 553 \$	292 993 \$	163 795 \$	517 341 \$	392 275 \$
	4	59 830 \$	233 248 \$	170 245 \$	463 323 \$	445 704 \$
	3	59 500 \$	175 070 \$	175 324 \$	409 894 \$	498 540 \$
	2	58 705 \$	117 127 \$	181 225 \$	357 058 \$	540 584 \$
	1*	61 506 \$	21 237 \$	159 090 \$	241 834 \$	613 764 \$
2	7	57 117 \$	59 700 \$	198 196 \$	315 014 \$	—
3	3	60 502 \$	175 070 \$	183 395 \$	418 966 \$	—

* : solution optimale

5.1 Analyse de sensibilité

Pour cette partie, la robustesse de la solution optimale (scénario 1, 1 site d'entreposage) et du scénario 3 (découpe en 3 zones) est évaluée. Les paramètres d'opération étudiés sont les coûts de transport (CF et CS) et le nombre de sorties quotidiennes (SQ_i). Pour les deux scénarios, la variation des coûts de transport n'a pas d'impact sur l'affectation et les coûts d'utilisation qui demeurent à 59 700 \$ et 175 070 \$ respectivement (voir tableaux 4 et 5). Pour le nombre de sorties quotidiennes, ce test consiste à ramener les sorties quotidiennes ainsi que le nombre de réceptions au niveau moyen des trois dernières années, les données initialement utilisées étant celles de 2001 seulement. Ce test permet d'évaluer les impacts sur le modèle de la tendance du marché. Le tableau 6 présente les résultats. Pour le scénario 3, malgré une sélection différente des sites d'entreposage, l'affectation des zones aux sites restent constantes.

De plus, une variation combinée de CF et CS n'a aucun impact sur la sélection des sites et l'affectation des zones aux sites ; seuls les coûts de transport varient.

Tableau 4 – Analyse de sensibilité pour la solution optimale, variation de CF et CS

CF (\$/min.) \ CS (\$/min.)	0,83	1,25 ^b	2,50
0,83		App. : 38 078 \$ Total : 295 975 \$	
1,25 ^a	Distrib. : 132 131 \$ Total : 248 949 \$	Total : 315 014 \$	Distrib. : 396 393 \$ Total : 513 211 \$
2,50		App. : 114 235 \$ Total : 372 132 \$	

^a Coûts d'approvisionnement constant : 57 117 \$

^b Coûts de distribution constant : 198 196 \$

Tableau 5 – Analyse de sensibilité pour le scénario 3,, variation de CF et CS

CF (\$/min.) \ CS (\$/min.)	0,83	1,25 ^b	2,50
0,83		App. : 40 334 \$ Total : 398 799 \$	
1,25 ^a	Distrib. : 122 263 \$ Total : 357 835 \$	Total : 418 966 \$	Distrib. : 366 789 \$ Total : 602 361 \$
2,50		App. : 121 003 \$ Total : 479 468 \$	

^a Coûts d'approvisionnement constant : 60 502 \$

^b Coûts de distribution constant : 183 395 \$

5.2 Séquence de fermeture

Comme les fermetures peuvent s'étaler sur plusieurs mois sinon plusieurs années, une séquence de fermeture à moindre coût peut être établie à l'aide de l'outil. L'objectif est de déterminer dans quel ordre on doit fermer les sites pour atteindre la configuration optimale. Il est important de souligner que l'optimalité porte sur la séquence complète de fermeture et non sur la somme des optimums locaux. Ainsi, la configuration d'une solution intermédiaire n'est pas nécessairement optimale pour le nombre de sites associés. Des contraintes sont ajoutées au modèle pour garder ouverts les sites inclus dans la solution finale. La méthodologie comporte plusieurs itérations pour la génération des solutions intermédiaires. À chaque itération, des contraintes sont ajoutées pour que les sites fermés à une itération demeurent fermés aux itérations suivantes.

Tableau 6 – Analyse de sensibilité pour la solution optimale et le scénario 3, variation de SQ_i

Variation de SQ_i	Sites d'entreposage	Coûts annuels			
		Approv.	Utilisation	Distribution	Total
Solution optimale					
Statu quo	St-Bruno	57 117 \$	59 700 \$	198 196 \$	315 014 \$
Moyenne triennale	St-Hyacinthe	50 919 \$	59 154 \$	179 575 \$	289 64 \$
Scénario 3					
Statu quo	Châteauguay St-Bruno Drummondville	60 502 \$	175 070 \$	183 395 \$	418 966 \$
Moyenne triennale	Châteauguay Granby Drummondville	52 747 \$	173 956 \$	164 085 \$	309 788 \$

6 Conclusion

L'outil de calcul proposé permet d'explorer différents scénarios d'ouverture et de fermeture de sites d'entreposage de façon à réduire les coûts d'exploitation des activités d'approvisionnement, d'entreposage et de distribution. Cependant, les analyses de sensibilité démontrent que le modèle demeure relativement sensible à la variation du nombre de réceptions et de sorties quotidiennes par site. L'utilisateur devra alors porter une attention particulière dans le choix de ces paramètres.

Afin de rendre le modèle plus complet ou tout simplement pour lui ajouter certains critères de décisions lors de l'optimisation, certaines restrictions pourraient être ajoutées au modèle, par exemple :

1. reconsidération de l'affectation des fournisseurs aux sites ;
2. nombre minimum de sites ouverts ;
3. respect de délais de service : distance maximale parcourue ou temps maximum de transport ;
4. ouverture/fermeture obligatoire d'un site ;
5. coûts minima de transport pour chaque lien fournisseur-site ;
6. fonction plus complexe de coûts relatifs aux sites d'entreposage lors de fermeture ;
7. capacité finie d'entreposage à chacun des sites ;
8. nombre maximum de sorties quotidiennes de poteaux par site ;
9. coûts de transport fonction d'un coût au kilométrage (\$/km) plutôt que coût temporel (\$/h) ;

10. affectation site-chantier par municipalité et non par secteur ;
11. temps moyen de transport pondéré, par exemple en fonction du nombre de sorties quotidiennes par municipalité.

Suite à la validation par l'analyse du territoire du Richelieu chez Hydro-Québec, l'outil informatique d'aide à la décision proposé doit être revu pour être appliqué à l'ensemble du territoire québécois en utilisant le modèle mathématique développé.

Annexe A – Données quotidiennes par sites d'entreposage

Tableau A1 – Valeur de paramètres

Opérations			Coûts			Durée de l'amortissement
FF	FS	CF	CS	CP_j	CO_j	5 ans
70 \$/min.	110 \$/min.	1,25 \$/min.	1,25 \$/min.	150 000 \$	25 000 \$	

Tableau A2 – Valeur de paramètres par sites d'entreposage

	Valleyfield	Vaudreuil	Châteauguay	St-Bruno ou St-Hubert	St-Jean	St-Hyacinthe	Granby	Sorel	Drummondville	Victoriaville	Sherbrooke
R_i (2001)	9	17	19	30	22	24	27	7	7	16	8
SQ_i (2001)	67	83	116	185	127	147	170	84	97	134	104
CI_j en \$ (2002)	4 410	3 157	2 942	4 700	4 099	4 154	3 586	1 601	2 427	2 802	3 178
Prop. ^a en %	90	141	128	142	157	125	144	79	77	104	71

^a Proportion par rapport à l'actuelle

Références

- [1] Direction Matériel, Hydro-Québec, (2000–2001), données.
- [2] Balinski, M. L., (1965) Integer Programming : Methods, Uses, Computation, *Management Science*, vol. 12, p. 253–313.