

# BSQ201 - Projet 2

## Optimisation du placement de cloches de dons de vêtements dans Sherbrooke



Ludovic Marcotte

Sahar Saoudi

Louis-Félix Vigneux

29 novembre 2024

RÉCUPEX

PASQAL

UDS

Université de  
Sherbrooke

# Table des matières

|          |  |           |
|----------|--|-----------|
| <b>1</b> | <b>Introduction</b>  | <b>2</b>  |
| <b>2</b> | <b>Théorie</b>   | <b>2</b>  |
| 2.1      | Conditions RÉCUPEX . . . . .   | 2         |
| 2.2      | Graphes . . . . .  | 3         |
| 2.2.1    | Introduction aux graphes . . . . .   | 3         |
| 2.2.2    | Ensemble indépendant maximal . . . . .   | 3         |
| 2.3      | Grapher sherbrooke . . . . .   | 4         |
| 2.4      | Ordinateur quantique à atome neutre . . . . .  | 5         |
| 2.5      | Trouver l'ensemble indépendant maximal à l'aide de l'ordinateur quantique à atome neutre . . . . . | 6         |
| 2.5.1    | Algorithme quantique adiabatique . . . . .   | 6         |
| 2.5.2    | Algorithme d'optimisation approximative quantique . . . . .  | 7         |
| 2.6      | Ensemble maximal indépendant en sous-graphe . . . . .  | 8         |
| <b>3</b> | <b>Méthodologie</b>  | <b>8</b>  |
| 3.1      | Tri de l'emplacement actuel des bacs . . . . .   | 9         |
| 3.2      | Rafiner la liste des endroits possibles . . . . .  | 9         |
| 3.3      | Trouver les nouveaux endroits des bacs retirés . . . . .   | 9         |
| <b>4</b> | <b>Résultats</b>   | <b>10</b> |
| <b>5</b> | <b>Discussion</b>  | <b>11</b> |
| <b>6</b> | <b>Conclusion</b>  | <b>12</b> |
| <b>7</b> | <b>À explorer (futur works)</b>  | <b>12</b> |
| <b>8</b> | <b>Références</b>  | <b>12</b> |
| <b>9</b> | <b>Annexe</b>  | <b>13</b> |

# Abstract

## 1 Introduction

**PARLER DE RÉCUPEX** Récupex est un organisme à but non lucratif dédié à l'insertion socioprofessionnelle des personnes en difficulté d'employabilité. L'organisme gère un vaste réseau de collecte de vêtements, avec une centaine de bacs répartis principalement à Sherbrooke et dans la région de l'Estrie. En partenariat avec des friperies et d'autres organismes communautaires, Récupex contribue activement à la valorisation des textiles usagés, sensibilisant la population aux enjeux environnementaux et recyclant environ 3,5 millions de livres de textiles chaque année.

La gestion des bacs de récupération de vêtements à Sherbrooke présente des défis importants pour Récupex. Les performances varient selon les emplacements en termes de volume de dons, de qualité des textiles et de nuisances (dépôts sauvages, vandalisme). La logistique de collecte demande des ressources significatives (chauffeurs, camions, matériel), rendant l'entretien complexe. Récupex cherche donc à optimiser l'emplacement de ses bacs pour améliorer la collecte, minimiser les nuisances et assurer une gestion efficace des ressources.

## 2 Théorie

### 2.1 Conditions RÉCUPEX

Récupex applique plusieurs critères pour optimiser l'emplacement de ses bacs de récupération de vêtements, en tenant compte des aspects de couverture, d'accessibilité, et de performance :

1. **Couverture des territoires non desservis** : Récupex cherche à s'assurer que chaque région a accès à un bac, en priorisant les territoires non encore desservis. Cela vise à améliorer l'accessibilité pour tous.
2. **Proximité et accessibilité** : Plus un bac est proche des habitants, plus il est accessible et utilisé. Récupex souhaite donc placer les bacs dans des zones faciles d'accès pour maximiser la collecte.
3. **Contrôle de la densité de bacs** : Bien qu'il soit important d'avoir des bacs à proximité, Récupex évite de multiplier les bacs dans la même zone pour éviter la redondance et les coûts inutiles.
4. **Qualité des dons** : La qualité des vêtements collectés varie selon les quartiers. Dans les zones plus aisées, les vêtements ont tendance à être de meilleure qualité. Cela peut influencer le placement des bacs en fonction des priorités de collecte de qualité.
5. **Densité de population** : Les secteurs densément peuplés sont plus propices à accueillir plusieurs bacs, car ils génèrent un volume de dons plus élevé.
6. **Pertinence et fonctionnalité des bacs** : Récupex suit la performance de chaque bac (s'il est régulièrement utilisé ou non) pour ajuster leur distribution, en ajoutant, déplaçant ou retirant des bacs selon leur pertinence dans chaque zone.
7. **Prendre en considération les autres associations** : Récupex prend en compte la présence d'autres associations, comme Estrie Aide, pour éviter une concurrence directe et mieux répartir les services.

8. **Autorisation pour le placement** : Le placement de chaque bac nécessite une autorisation, et il est plus facile d'obtenir cette autorisation dans des zones où les propriétaires sont plus ouverts au projet.

## 2.2 Graphes

### 2.2.1 Introduction aux graphes

Un graphe est un objet mathématique très utile lorsqu'une carte doit être représentée dans un ordinateur [1][2]. Ce dernier est représenté par un ensemble  $G = (V, E)$  où  $V$  est un ensemble de sommets et  $E$  l'ensemble des arrêtes du graphe. Un sommet est un point dans l'espace qui sera connecté à un autre grâce à une arrête. Voici la manière usuelle de représenter un graphe.

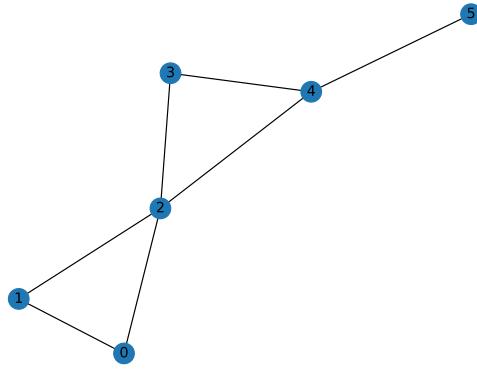


FIGURE 2 – Exemple de graphe

Par contre, l'utilisation de graphes par disques unitaires sera plus approprié pour le projet. Dans ce type de graphe, on note la position des sommets dans l'espace et non leur relation entre eux. Pour définir les opérations, nous traçons un disque de rayon arbitrairement défini plutôt auparavant. Ensuite, si deux cercles de deux sommets distincts se croisent, il y a alors une interaction entre ces deux sommets. Voici la comparaison entre un graphe de disque unitaire et son analogue de représentation plus «classique».

### 2.2.2 Ensemble indépendant maximal

Un ensemble indépendant maximal est un ensemble de sommets qui ne sont pas connectés par une arête. Cet ensemble doit contenir le plus de sommets possible afin d'être complet. Par exemple, le graphe de la figure 1 comporte 6 noeuds et son ensemble indépendant maximal en comporte 3.

Il peut y avoir plusieurs ensembles indépendants maximaux pour un seul graphe comme c'est le cas avec le graphe précédent. Les ensembles correspondants seraient 1, 4, 6 et 2, 4, 6 comme illustré par la figure 2.

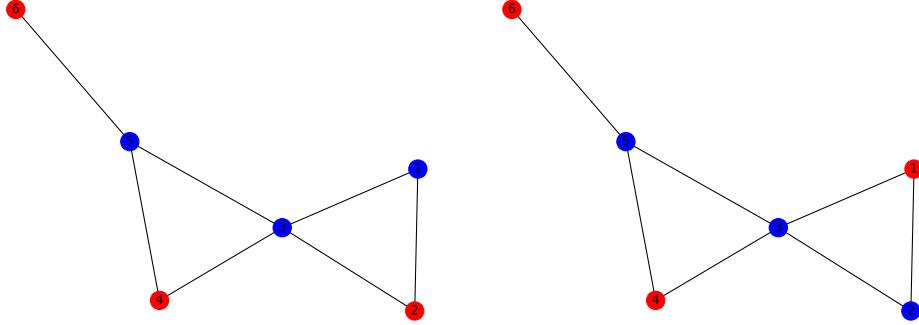


FIGURE 3 – Ensembles indépendants maximaux pour le graphe de la figure 1.

### 2.3 Grapher sherbrooke

Récupex se doit de couvrir l'ensemble de Sherbrooke au meilleur de ses possibilités avec ses 60 bacs. Il faut alors trouver une manière de représenter la ville dans l'ordinateur quantique. Pour ce faire, nous allons utiliser un graphe.

Pour utiliser cet objet mathématique dans notre problématique, nous allons représenter tout les emplacement possible des bacs par un sommet du graphe. Ces emplacements ont été définis grâce à une base de données des édifices commerciaux et industriels de la ville de Sherbrooke [3]. Nous avons raffiné cette base de données en gardant seulement les commerces, les institutions et lieux publics. En effet, les bacs ne peuvent pas être placés sur un terrain résidentiel ou industriel pour encourager les dons. Nous allons représenter le graphe de la ville selon un graph de disque unitaire. Les sommets du graphe sont donc ces emplacements possibles et nous nottons leur position dans l'espace par leur longitude sur l'axe des x et leur latitude sur l'axe des y. Par la suite, pour définir les arrêtes du graphes, il suffit de définir un rayon pour lequelles les endroits possibles sont connectés. Par la suite, un algorithme d'ensemble indépendant maximal pourra être utilisé pour faire ressortir le nombre maximal d'emplacement qui ne sont pas trop proches des autres pour mettre des bacs.

Puisque les ordinateurs quantiques utilisés dans ce projet ont une limite de 25 atomes, nous devons alors simplifier ces graphes. Pour ce faire, nous avons utilisé un algorithme d'ensemble indépendant maximal classique pour réduire le nombre de données d'environ 3000 à 125 en utilisant un rayon de 1km. Cette opération crée déjà un pré-tri des endroits possibles en retirant des emplacements déjà trop près l'un de l'autre. Voici la simplification sous forme d'image.

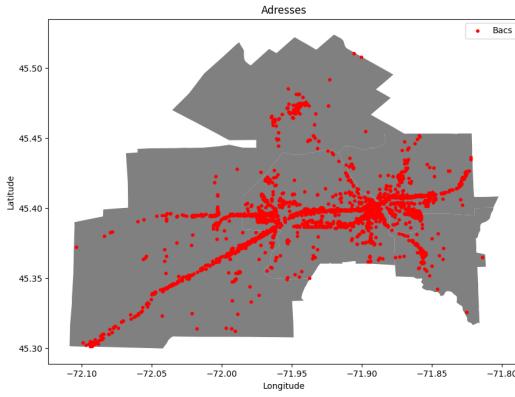


FIGURE 4 – Emplacements possibles des bacs dans la ville de Sherbrooke

Cette carte de simplification sera utilisée pour le reste des calculs.

## 2.4 Ordinateur quantique à atome neutre

L'ordinateur quantique à atome neutre est un ordinateur quantique analogique. Les calculs nécessitent des manipulations afin d'être effectués. Pour ce projet, nous utiliserons les appareils développés par Pasqal [4]. La première étape est de créer un registre contenant des atomes à certaines positions afin de représenter notre problème dans l'ordinateur. Pour ce projet, nous ne considéreront seulement que des registres en deux dimension. Des pinces optiques sont positionnées [5] aux endroits déterminés afin de capturer les atomes. Puisque le taux de capture des pinces optiques est d'environ 50%, le double du nombre de pinces optiques sont placés dans le registre. Après la capture des atomes, on vérifie la position des atomes capturés et les atomes sont replacés un à un afin de créer le registre voulu. Tout ce processus est fait directement par Pulser [6] lors de la création d'un registre. Le calcul quantique se fait à l'aide d'un pulse. Le pulse peut avoir plusieurs formes et atteint une certaine valeur maximale  $\Omega_{max}$  qui définit le rayon de blocage. Le rayon de blocage définit un cercle autour des atomes du registre. Les atomes se tenant à l'intérieur de ce cercle demandent un pulse beaucoup plus grand afin de s'exciter. Une autre valeur importante pour le pulse est le désaccord. Le désaccord est une valeur qui influe sur le pulse envoyé. Un désaccord négatif pousse les atomes dans l'état fondamental alors qu'un désaccord positif pousse les atomes dans l'état excité. Durant le pulse, certains atomes vont s'exciter et seront alors éjectés du registre. On mesure donc par fluorescence les atomes dans l'état fondamental présents dans le registre à la suite du pulse pour déduire que les atomes manquants sont les atomes qui ont été excités. Cette mesure est aussi effectuée par Pulser directement. Ainsi, pour utiliser l'ordinateur quantique à atome neutre de Pasqal, l'utilisateur doit simplement définir une séquence contenant la forme du registre et le Pulse en fonction du temps.

## 2.5 Trouver l'ensemble indépendant maximal à l'aide de l'ordinateur quantique à atome neutre

Maintenant que nous savons utiliser l'ordinateur quantique à atome neutre, nous allons résoudre le problème np complet [7] qu'est de trouver l'ensemble maximal indépendant d'un graphe géométrique [8]. Deux méthodes s'offrent à nous, l'algorithme quantique adiabatique ou bien l'algorithme d'optimisation approximative quantique [9].

### 2.5.1 Algorithme quantique adiabatique

La première étape est de créer le registre en fonction du graphe. La clé est de ne considérer que les interactions entre les noeuds du graphe. Ces interactions sont reliées directement au rayon de blocage dans le registre. On doit alors positionner les atomes afin que s'il devrait y avoir une arête entre le deux atomes, les atomes sont couverts par le rayon de blocage de l'autre atome. Il ne reste plus qu'à construire un pulse avec une valeur de  $\Omega_{max}$  en fonction du rayon de blocage souhaité comme en exemple à la figure 5.

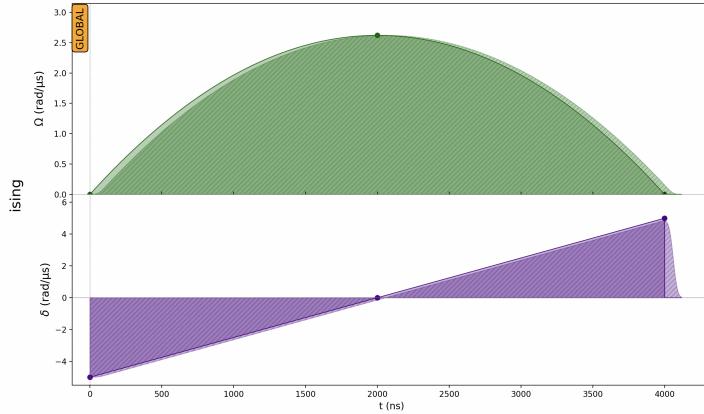


FIGURE 5 – Exemple de Pulse adiabatique

L'algorithme quantique adiabatique tente de transformer un hamiltonien initial en un hamiltonien final en lui appliquant le pulse pendant le plus de temps possible. L'hamiltonien initial du système est ici représenté par le registre initial que l'on crée. En lui appliquant le Pulse pendant assez longtemps, on trouve notre hamiltonien final qui encode la solution. En fait, on a vu que le rayon de blocage va empêcher les atomes qui sont dans ce rayon de s'exciter. Puisque les noeuds qui sont liés par une arête sont contenus dans le rayon de blocage, un seul des deux va pouvoir s'exciter. Ainsi, notre hamiltonien final ne contiendra que des atomes excités qui forment un ensemble indépendant maximal. Le calcul quantique ne donne pas toujours le même résultat et ne donne pas toujours l'ensemble indépendant maximal. En fait, puisque nous sommes limité par le temps durant lequel nous pouvons appliquer le pulse. Nous n'obtenons pas la meilleure réponse à chaque fois. Si le pulse pouvait s'appliquer beaucoup plus longtemps, il nous faudrait théoriquement un seul calcul pour trouver directement l'ensemble indépendant maximal par le théorème adiabatique [10]. On effectue donc le calcul un certain nombre de fois afin d'obtenir un histogramme contenant plusieurs résultats. Les résultats qui sortent le plus souvent dans l'histogramme sont des ensembles maximaux indépendants. Par exemple, on pourrait prendre le graphe

de la figure 1 et trouver l'ensemble indépendant maximal avec les étapes expliquées ci-dessus afin d'obtenir le registre et l'histogramme de la figure 6.

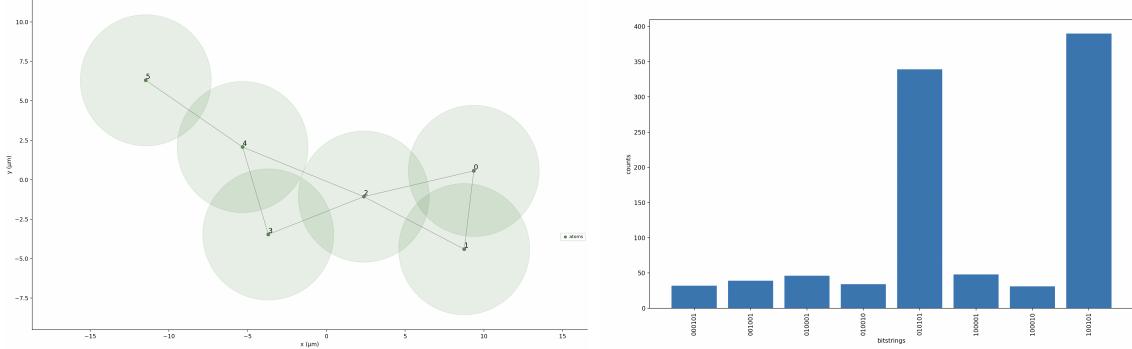


FIGURE 6 – Registre quantique et l'histogramme associé à ce registre après 1000 tentatives

On trouve donc les deux solutions :  $\{0, 3, 5\}$ ,  $\{1, 3, 5\}$  qui correspondent bien aux deux solutions admises de ce graphe à la figure 2.

### 2.5.2 Algorithme d'optimisation approximative quantique

— Il faut s'assurer de l'histogramme !!! —

L'algorithme d'optimisation approximative quantique (QAOA) est une méthode largement utilisée pour résoudre des problèmes d'optimisation combinatoire, tels que le problème de l'ensemble indépendant maximal [11]. Dans ce projet, on va évaluer l'efficacité de son implémentation sur des ordinateurs quantiques à atomes neutres pour un problème MIS. On va commencer par la création d'un registre où les interactions entre les qubits sont déterminées par les positions des noeuds du graphe et le rayon de blocage. Ce rayon correspond à la distance minimale entre deux qubits pour éviter les interactions non souhaitées. ( déjà explique dans la paragraphe precedente .. est ce que je dois le refaire .. ?)

L'algorithme QAOA alterne entre deux pulses sur  $p$  couches, chacun représentant un Hamiltonien spécifique. Le premier, appelé *Hamiltonien de mélange (mixing Hamiltonian)*, est paramétré par  $\Omega$  et  $T_{\text{mixer}}$  et est conçu pour permettre l'exploration de l'espace des solutions. Le second, appelé *Hamiltonien de coût ( $H_q$ )*, encode la fonction objectif à optimiser. Ce deuxième pulse, paramétré par  $\Omega$  et  $T_{\text{cost}}$ , oriente l'évolution du système vers des états correspondant aux solutions optimales.

En appliquant cette méthode sur le graphe de la figure 1, les résultats obtenus sont présentés dans l'histogramme ci-dessous. On peut observer que les bitstrings correspondant aux solutions optimales sont présents, mais pas avec la fréquence la plus élevée. Cela s'explique par la profondeur limitée du circuit QAOA, qui empêche l'algorithme de converger pleinement vers les solutions optimales. De plus, d'autres bitstrings non optimaux apparaissent avec des fréquences significatives, ce qui reflète une exploration plus variée de l'espace des solutions. On peut observer les différences entre les résultats donnés par cette méthode et la méthode QAA (*Quantum Adiabatic Algorithm*), où l'histogramme montre une concentration beaucoup plus marquée sur les solutions optimales. Cela démontre que, bien que le QAOA permette une exploration plus large, il est moins déterministe que le QAA.

( parler un peu plus du qaoa vs qaa dans discussion ? )

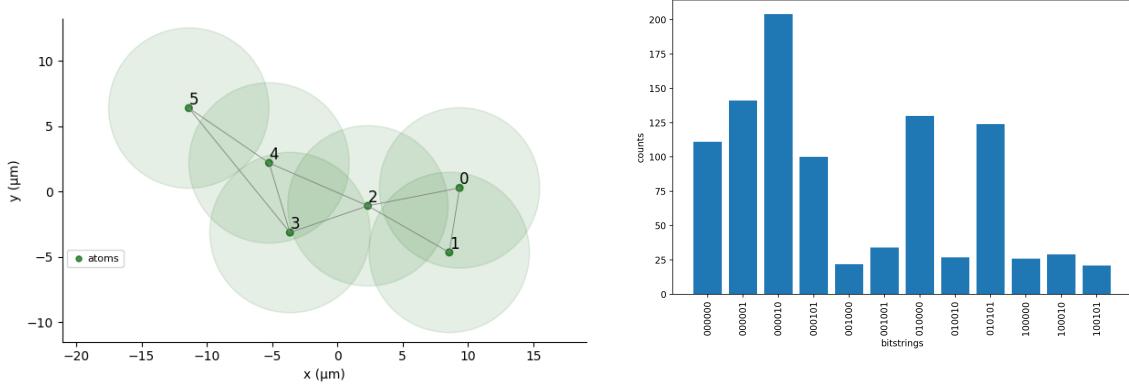


FIGURE 7 – Registre quantique et l’histogramme associé à ce registre

## 2.6 Ensemble maximal indépendant en sous-graphe

Sachant que le simulateur quantique ne peut traiter que des problèmes à 25 atomes (équivalent à un graphe d’au plus 25 sommet que l’on tente de trouver l’ensemble indépendant maximal), le graphe contenant beaucoup plus de point doit être traité en sous-intences de graphe. Pour ce faire, l’algorithme METIS développé entre autre par George Karypis et Vipin Kumar est utilisé [12]. Il permet de séparer un graphe en n sous-graphes contenant environ le même nombre de sommets tout en minimisant le nombre d’arrêtes perdus dans la somme des sous-graphes. Cet algorithme sera utile puisqu’il permet de créer juste le nombre d’instances de sous-graphe nécessaire pour faire le moins de calcul quantique possible tout en gardant le plus d’information possible.

Par la suite, pour recombiner les ensembles indépendants maximaux des sous-graphes, nous allons effectuer un algorithme permettant de fusionner une paire de ceux-ci. Selon Michael Blondin, professeur en algorithmie à l’Université de Sherbrooke, il est possible de créer un ensemble indépendant maximal rapidement en prenant simplement les noeuds impliqués dans les MIS et la connexion entre les graphes. Autrement dit, en créant le graphe reliant les points du MIS des sous-graphes A et B selon les arrêtes du graphe initial. Nous n’incluons pas les sommets qui n’ont pas d’arrêtes reliant un sommet de l’autre sous-graphe.

Le graphe obtenu est acyclique et nommé forêt. Il est possible de trouver l’ensemble maximal indépendant de ce type de graphe par un algorithme classique inspiré de la programmation dynamique. Même s’il n’existe pas de garanti que la solution ne sera pas un ensemble indépendant maximal, il restera tout de même indépendant et cette recombinaison permet d’utiliser le simulateur quantique avec une bonne approximation de la réponse.

## 3 Méthodologie

La réattribution des bacs plus efficace dans la ville se sépare dans les 3 grandes sections suivantes.

### **3.1 Tri de l'emplacement actuel des bacs**

La première étape consiste à retirer des bacs dans leur répartition actuelle. En effet, en utilisant l'algorithme du stable maximum (MIS), des bacs seront enlevés. Le graphe sera construit comme suit :

- Les bacs représenteront les sommets du graphes.
- Deux sommets du graphe sont reliés si les bacs en question sont à **XX** km ou moins de distance. Par contre, cette arête est retirée si le volume moyen annuel de vêtement reçu de chacun des bacs impliqués est d'au moins **XX**. Les données de volumes récoltés annuels sont directement fournies par Récupex.

Des solutions données, nous prenons celle maximisant le volume de don total. Notons  $n$  le nombre de bacs retirés par le MIS.

**À voir si on fait vraiment cela**

### **3.2 Rafiner la liste des endroits possibles**

Avec les données de l'ensemble indépendant maximal résultant, les commerces à un rayon de **XXm** d'un bac seront retirés de la base de données des emplacements possibles de bacs. Les emplacements possibles sont discutés dans la théorie.

### **3.3 Trouver les nouveaux endroits des bacs retirés**

Par la suite, un graphe sera créé avec la liste raffinée des endroits possibles pour mettre les bacs.

- Les sommets seront les endroits possibles.
- Deux sommets seront reliés par une arête si la distance entre leur endroit possible associé est moins de **XX** km. Par la suite, un algorithme de MIS sera utilisé (en divisant en sous-graphe puisque le simulateur quantique est utilisé).

## 4 Résultats

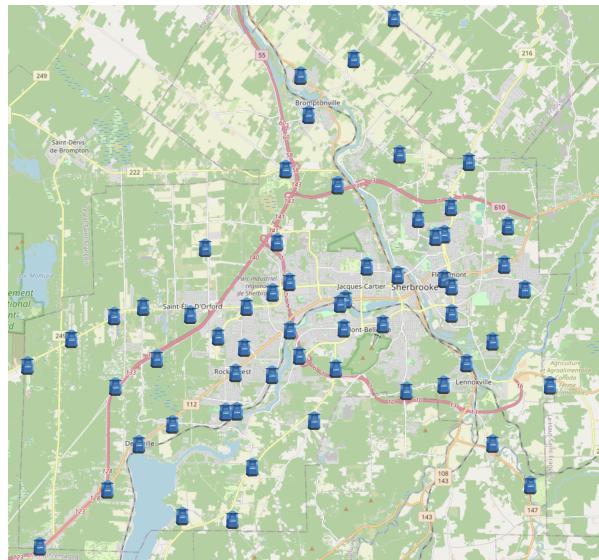


FIGURE 8 – Répartition des bacs après l'usage de notre algorithme quantique

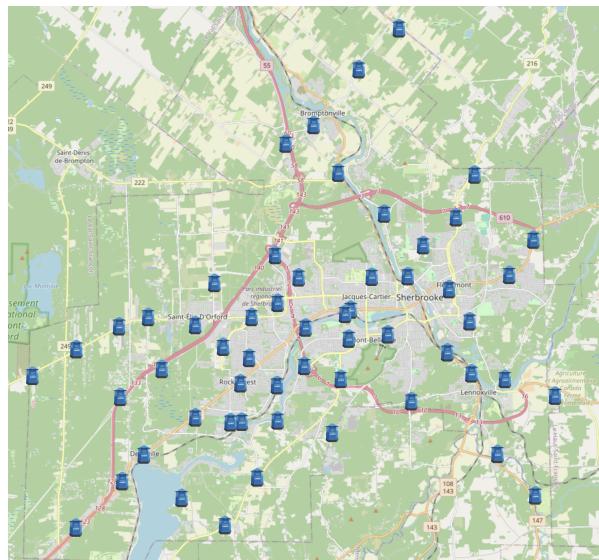


FIGURE 9 – Répartition des bacs après l'usage de notre algorithme classique

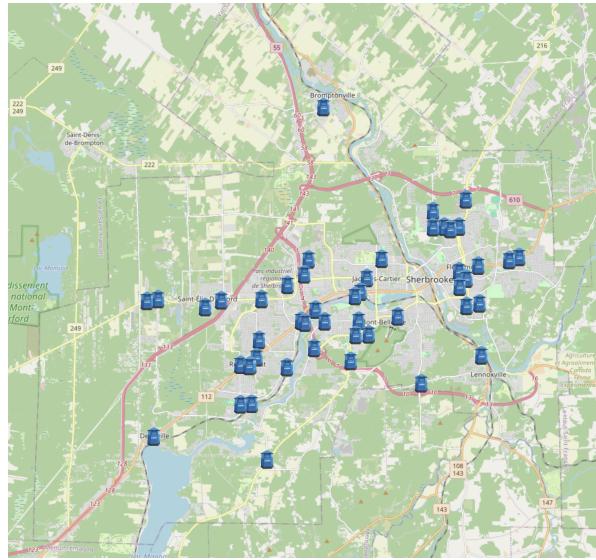


FIGURE 10 – Répartition des bacs à l'origine

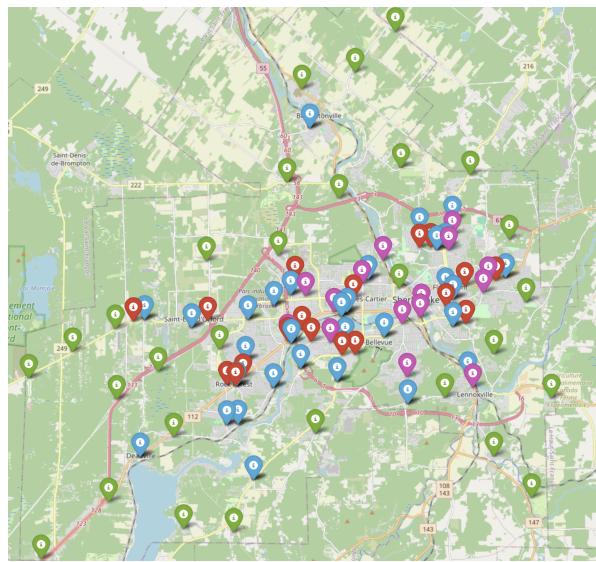


FIGURE 11 – Carte des cloches après l'usage de notre algorithme quantique (les points violets représentent les bacs d'Estrie-Aide, les points verts représentent les bacs ajoutés, les points rouges représentent les bacs enlevés les points bleus représentent les bacs conservés).

## 5 Discussion

Pertinence de notre solution obtenue...

Il faut considérer le nombre de ressources qui sont utilisées pour obtenir nos résultats. ...

Time to solution...[13]

La création d'un registre de façon générale pour un graphe de disque unitaire limite notre algorithme quantique puisque le registre est mal généré pour des graphes non-connexes. Nous

devons utiliser moins d'atomes et nous perdons donc en précision lors de l'étape de recombinaison classique.

On peut espérer que dans le futur, l'ordinateur quantique à atome neutre continue d'évoluer et nous permette d'utiliser un plus grand registre contenant plus d'atomes [14]. De cette façon, nous n'aurions plus besoin d'approximer le graphe total en plusieurs sous-graphes et obtenir seulement un ensemble indépendant maximal approximatif à cause de la recombinaison. Nous trouverions plutôt les ensembles indépendants maximaux et nous pourrions obtenir une meilleure solution plus simplement. Si on suit la feuille de route de Pasqal, le problème devrait être soluble sans avoir à couper le graphe dans les prochaines années [15].

## 6 Conclusion

inclure ouverture sur les travaux futurs à explorer (king's lattice[16], scaling par composantes connexes[17], registre par fonction de coût)

## 7 À explorer (futur works)

## 8 Références

- [1] W. A. MACKANESS et K. M. BEARD, "Use of Graph Theory to Support Map Generalization," *Cartography and Geographic Information Systems*, t. 20, n° 4, p. 210-221, jan. 1993, Publisher : Taylor & Francis \_ eprint : <https://doi.org/10.1559/152304093782637479>, ISSN : 1050-9844. DOI : 10.1559/152304093782637479. adresse : <https://doi.org/10.1559/152304093782637479> (visité le 27/11/2024).
- [2] F. RIAZ et K. M. ALI, "Applications of Graph Theory in Computer Science," in *2011 Third International Conference on Computational Intelligence, Communication Systems and Networks*, juill. 2011, p. 142-145. DOI : 10.1109/CICSyN.2011.40. adresse : <https://ieeexplore.ieee.org/document/6005872/?arnumber=6005872> (visité le 27/11/2024).
- [3] *Répertoire des locaux et entreprises du territoire de Sherbrooke - Liste des locaux et entreprises du territoire de Sherbrooke - Données Québec*, fr. adresse : <https://www.donneesquebec.ca/recherche/dataset/repertoire-des-entreprises/resource/93cb0f78-50bc-431b-a2ba-f66511450441> (visité le 27/11/2024).
- [4] A. BROWAEYS, "Quantum computing and simulation with arrays of Rydberg atoms : from proof-of-principle experiments to the startup PASQAL," in *Quantum Computing Workshop CEA-LETI*, Grenoble, France, mai 2019. adresse : <https://hal.science/hal-04334541> (visité le 20/11/2024).
- [5] A. BROWAEYS, "Des pinces optiques pour piéger des atomes un par un...," fr, *Reflets de la physique*, n° 47-48, p. 36-40, mars 2016, ISSN : 1953-793X, 2102-6777. DOI : 10.1051/refdp/20164748036. adresse : <http://www.refletsdelaphysique.fr/10.1051/refdp/20164748036> (visité le 20/11/2024).
- [6] H. SILVÉRIO, S. GRIJALVA, C. DALYAC et al., "Pulser : An open-source package for the design of pulse sequences in programmable neutral-atom arrays," en, *Quantum*, t. 6, p. 629, jan. 2022, arXiv :2104.15044 [quant-ph], ISSN : 2521-327X. DOI : 10.22331/q-2022-01-24-629. adresse : <http://arxiv.org/abs/2104.15044> (visité le 20/11/2024).

- [7] R. E. TARJAN et A. E. TROJANOWSKI, “Finding a Maximum Independent Set,” English, *SIAM Journal on Computing*, t. 6, n° 3, p. 10, sept. 1977, Num Pages : 10 Place : Philadelphia, United States Publisher : Society for Industrial and Applied Mathematics, ISSN : 00975397. DOI : 10.1137/0206038. adresse : <https://www.proquest.com/docview/918487890/abstract/47A9ABD86D0F4B3CPQ/1> (visité le 20/11/2024).
- [8] C. P. DETTMANN et O. GEORGIOU, “Random geometric graphs with general connection functions,” en, *Physical Review E*, t. 93, n° 3, p. 032313, mars 2016, ISSN : 2470-0045, 2470-0053. DOI : 10.1103/PhysRevE.93.032313. adresse : <https://link.aps.org/doi/10.1103/PhysRevE.93.032313> (visité le 20/11/2024).
- [9] S. EBADI, A. KEESLING, M. CAIN et al., *Quantum Optimization of Maximum Independent Set using Rydberg Atom Arrays*, arXiv :2202.09372, fév. 2022. adresse : <http://arxiv.org/abs/2202.09372> (visité le 20/11/2024).
- [10] M. H. S. AMIN, “Consistency of the Adiabatic Theorem,” en, *Physical Review Letters*, t. 102, n° 22, p. 220401, juin 2009, ISSN : 0031-9007, 1079-7114. DOI : 10.1103/PhysRevLett.102.220401. adresse : <https://link.aps.org/doi/10.1103/PhysRevLett.102.220401> (visité le 20/11/2024).
- [11] E. FARHI, J. GOLDSTONE et S. GUTMANN, *A Quantum Approximate Optimization Algorithm*, arXiv :1411.4028, nov. 2014. DOI : 10.48550/arXiv.1411.4028. adresse : <http://arxiv.org/abs/1411.4028> (visité le 22/11/2024).
- [12] G. KARYPIS et V. KUMAR, “Multilevelk-way Partitioning Scheme for Irregular Graphs,” en, *Journal of Parallel and Distributed Computing*, t. 48, n° 1, p. 96-129, jan. 1998, ISSN : 07437315. DOI : 10.1006/jpdc.1997.1404. adresse : <https://linkinghub.elsevier.com/retrieve/pii/S0743731597914040> (visité le 27/11/2024).
- [13] M. R. ZIELEWSKI et H. TAKIZAWA, “A Method for Reducing Time-to-Solution in Quantum Annealing Through Pausing,” en, in *International Conference on High Performance Computing in Asia-Pacific Region*, Virtual Event Japan : ACM, jan. 2022, p. 137-145, ISBN : 978-1-4503-8498-8. DOI : 10.1145/3492805.3492815. adresse : <https://dl.acm.org/doi/10.1145/3492805.3492815> (visité le 27/11/2024).
- [14] *Pasqal exceeds 1,000 Atoms in Quantum Processor*, en-US. adresse : <https://www.pasqal.com/news/pasqal-exceeds-1000-atoms-in-quantum-processor/> (visité le 20/11/2024).
- [15] *Our Quantum Roadmap*, en-US. adresse : <https://www.pasqal.com/our-technology/our-roadmap/> (visité le 20/11/2024).
- [16] K. KIM, M. KIM, J. PARK, A. BYUN et J. AHN, *Quantum Computing Dataset of Maximum Independent Set Problem on King’s Lattice of over Hundred Rydberg Atoms*, arXiv :2311.13803, nov. 2023. DOI : 10.48550/arXiv.2311.13803. adresse : <http://arxiv.org/abs/2311.13803> (visité le 22/11/2024).
- [17] F. CHUNG et L. LU, “Connected Components in Random Graphs with Given Expected Degree Sequences,” en, *Annals of Combinatorics*, t. 6, n° 2, p. 125-145, nov. 2002, ISSN : 0219-3094. DOI : 10.1007/PL00012580. adresse : <https://doi.org/10.1007/PL00012580> (visité le 22/11/2024).

## 9 Annexe