

Élaboration de séquences de rénovation optimales pour un parc de bâtiments

Marie-Lise Pannier*^{1,2}, Thomas Recht¹, Maxime Robillart³, Bruno Peuportier⁴, Laurent Mora¹

¹ Univ. Bordeaux, I2M Bordeaux

351 cours de la Libération, F-33400 Talence, France

² Univ. Angers, LARIS EA 7315

62 Avenue Notre-Dame-du-Lac, 49000 Angers, France

³ Kocliko

185 Boulevard du Maréchal Leclerc, 33000 Bordeaux, France

⁴ MINES ParisTech, PSL Research University, CES

60 Bd Saint Michel, 75006, Paris, France

*marie-lise.pannier@univ-angers.fr

RÉSUMÉ. L'identification de stratégies de réhabilitation optimales pour un parc de bâtiments est une tâche complexe. De nombreuses actions de rénovation sont envisageables à l'échelle d'un parc. De plus, du fait de contraintes budgétaires, il convient de déterminer dans quels bâtiments et dans quelles actions de rénovations investir en premier lieu. Pour aider les gestionnaires de parcs à définir leurs priorités, un outil adapté au contexte de la réhabilitation séquentielle de parcs de bâtiments a été développé. Les spécificités de cet outil, basé sur le couplage entre simulation thermique dynamique (STD) et optimisation multi-objectif, sont présentées dans cet article. L'outil a ensuite été appliqué à un parc de logements sociaux francilien. Les actions de rénovation envisageables pour ce parc ont été définies en collaboration avec un bureau d'études. Des études statistiques menées sur les séquences optimales de rénovation identifiées par l'outil, ont permis de tirer des conclusions sur la priorisation des actions et offrent un premier niveau d'aide à la décision.

MOTS-CLÉS : réhabilitation de parcs de bâtiments, séquençage des travaux, optimisation multi-objectif.

ABSTRACT. Identifying optimal refurbishment strategies for a building stock is complex. Numerous renovation actions can be undertaken at the stock level. Furthermore, due to budget constraints, it should be determined in which buildings and in which actions to invest first. In order to help building stock managers to set their priorities, a tool has been developed. This tool is adapted to the building stock refurbishment context and it is based on the coupling of dynamic building energy simulation with multi-objective optimisation. The tool has been applied to a social housing stock located in Greater Paris Area. The practicable renovation actions for this stock have been discussed with an engineering design office. Statistical studies performed on the optimal sequences helped drawing conclusions regarding the action to be performed in priority and provide a first level of decision-aid.

KEYWORDS: building stock refurbishment, renovation time sequences, multi-objective optimisation.

1. INTRODUCTION

La réhabilitation des bâtiments est une priorité dans la lutte contre le changement climatique et la précarité énergétique. Cependant, améliorer la performance globale de parcs de bâtiments est une tâche ardue : à l'échelle d'un parc, un grand nombre de combinaisons d'actions de rénovation est envisageable. De plus, un gestionnaire de parc a un budget d'investissement limité chaque année pour des travaux de rénovation et il est difficile de définir dans quelles actions et dans quels bâtiments investir

en priorité. Le choix des stratégies de rénovation les plus durables, et leur priorisation dans le temps, compte tenu des diverses contraintes (économiques, techniques, sociales, etc.) pesant sur un parc de bâtiments, se révèle être un problème d'optimisation combinatoire complexe. Pour aider à définir les séquences de rénovations optimales d'un parc de bâtiments, un outil d'optimisation multi-objectif dédié a été développé. Les développements menés s'inscrivent dans la continuité des travaux de thèse de Rivallain (2013), sur la rénovation séquentielle de bâtiments, et de Recht (2016), en conception de bâtiments neufs. En particulier, le couplage existant entre la simulation thermique dynamique (réalisée avec COMFIE) et l'algorithme génétique NSGA-II, a été étendu pour s'adapter à la complexité d'un parc à rénover sur plusieurs années.

Les spécificités de l'outil développé sont présentées dans la section « Méthodologie ». Son fonctionnement est ensuite illustré sur le cas d'un parc de sept logements sociaux. Les caractéristiques de ce parc et les actions de rénovation étudiées sont exposées à la section « Cas d'étude ». Enfin, la section « Résultats » présente les séquences optimales trouvées pour plusieurs variantes d'optimisation.

2. METHODOLOGIE

Une approche ascendante (« *bottom-up* ») est retenue pour la modélisation du parc de bâtiments. Partant de données fournies par un questionnaire de parc, des bâtiments représentatifs ont été choisis, à dire d'expert, afin de créer un parc virtuel ayant des caractéristiques similaires à celles du parc réel. Il est alors possible de modéliser les quelques bâtiments représentatifs identifiés et d'évaluer leur performance en utilisant un outil de STD. Les performances individuelles des bâtiments sont ensuite agrégées pour aboutir à celles du parc.

Lors de l'étude des séquences de réhabilitation optimales pour un parc, il n'est pas envisageable d'évaluer les performances de chaque variante de rénovation. La combinatoire serait trop élevée du fait du nombre d'actions combinées de rénovation, de bâtiments étudiés et d'années de travaux considérées. Un algorithme d'optimisation multi-objectif, reposant sur le concept d'optimum de Pareto, et permettant une gestion des contraintes, est alors utilisé.

L'outil développé pour déterminer les séquences de rénovations optimales à appliquer sur un parc se base ainsi sur une plateforme de simulation existante, couplant STD et algorithme d'optimisation.

2.1. PLATEFORME DE SIMULATION

Le modèle physique réduit COMFIE (Peuportier et Blanc-Sommereux 1990) de la suite logicielle *Pléiades* est utilisé pour la STD de chaque bâtiment. L'optimisation est ensuite menée avec l'algorithme génétique NSGA-II (Deb et al. 2002), disponible dans le module *AMAPOLA* de *Pléiades*. Avec cet algorithme, les performances d'une population d'individus (des bâtiments dans notre contexte) sont progressivement améliorées grâce à l'application de mécanismes de croisement, de mutation, et de sélection, génération après génération, des meilleurs individus selon les critères préalablement définis. Au début de ces travaux, la plateforme permettait d'optimiser la conception d'un seul bâtiment à la fois.

2.2. ADAPTATIONS DE LA PLATEFORME POUR LA RENOVATION D'UN PARC DE BATIMENTS

Dans le contexte de la réhabilitation de parcs, un individu au sens de l'algorithme génétique correspond, à un ensemble de N bâtiments sur lesquels des travaux de rénovations sont échelonnés sur M années (Figure 1). Pour s'adapter à ces spécificités, la plateforme a été étendue pour mener l'optimisation sur plusieurs bâtiments, en échelonnant les travaux dans le temps et en intégrant plusieurs

contraintes. De plus, pour limiter les temps de calcul, des solutions triviales sont introduites et un archivage des simulations est mis en place. Ces développements sont détaillés dans la suite.

En présence de **plusieurs bâtiments**, l'information génétique d'un individu (*i.e.* l'ensemble des travaux de rénovation à mener sur les N bâtiments) est portée par un même chromosome pour tous les bâtiments. Ce choix a une influence sur le mécanisme de croisements entre individus (un seul point de coupure pour tous les bâtiments), mais pas sur celui de mutation, qui s'applique au niveau des gènes.

Le **séquençage des travaux** dans le temps est rendu possible par l'utilisation de deux chromosomes pour représenter un individu, comme proposé par Rivallain (2013). Un premier chromosome, nommé « composition », regroupe les actions de rénovation menées sur chaque bâtiment. Le second chromosome, nommé « ordre », renseigne sur l'année au cours de laquelle l'action (définie dans le chromosome composition) est réalisée sur le bâtiment. La Figure 2 illustre cette représentation.

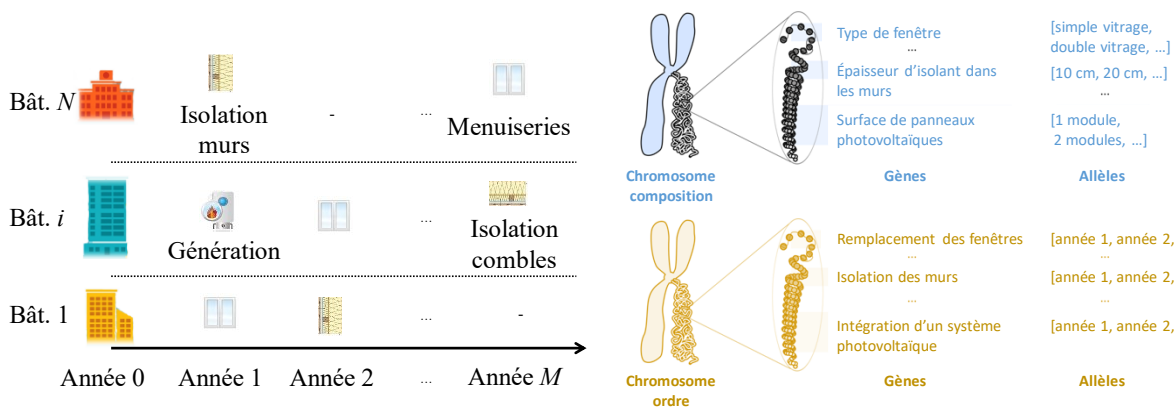


Figure 1 : Individu au sens de l'algorithme génétique en rénovation de parc de bâtiments.

Figure 2 : Représentation de l'information génétique sur deux chromosomes.

Pour éviter les dépassements de budget, des **contraintes pluriannuelles** de financement et globales (sur toute la durée des travaux) sont intégrées. La plateforme a donc été étendue pour prendre en compte plusieurs contraintes. Une approche par tournoi permet de comparer les individus lors du processus de sélection. La comparaison entre individus se fait alors en fonction du nombre de contraintes violées.

La prise en compte de plusieurs bâtiments, étudiés sur plusieurs années, et sur lesquels peuvent s'appliquer plusieurs actions de rénovation, fait significativement augmenter la combinatoire du problème. Cela conduit à ralentir la convergence de l'algorithme. Pour rendre plus efficace la recherche d'optimums, des **solutions triviales** du problème sont introduites dans la population initiale. Ainsi, la population initiale n'est plus initialisée complètement aléatoirement : certains individus voient leur information génétique remplacée par celle d'individus, dont on suppose qu'ils appartiendront au front de Pareto final. Par exemple, si les objectifs d'une optimisation sont de minimiser les consommations énergétiques et le coût d'investissement total, l'individu « tous les bâtiments sont rénovés à la performance maximale » constitue un extremum du front de Pareto, puisqu'il aura la consommation énergétique la plus faible et le coût d'investissement le plus élevé. Cette solution, que l'algorithme pourrait difficilement identifier du fait de la combinatoire, est alors introduite dans la population initiale.

Enfin, une même combinaison d'actions de rénovation pour un bâtiment peut se retrouver dans plusieurs variantes de parc et sur plusieurs années (si les travaux commencent l'année 3 pour un bâtiment, les états de ce bâtiment sont identiques au cours des années 1 et 2). Pour ne pas simuler plusieurs fois le même état d'un bâtiment, un **archivage des simulations** est mis en place. L'ensemble

des STD (*i.e.* l'ensemble des états possibles de chaque bâtiment) est réalisé au début du processus d'optimisation et les sorties utiles sont mises en mémoire vive. Pour chaque individu, les caractéristiques de chaque bâtiment, à chaque année de travaux, sont recombinaées à partir des données en mémoire vive.

3. CAS D'ETUDE

L'outil développé a été utilisé pour déterminer les séquences de rénovations optimales à appliquer sur un parc virtuel de logements sociaux. Ce parc a été défini à partir de données de l'Office Public de l'Habitat de Montreuil (OPHM). Il se veut représentatif d'un parc réel de par les morphologies et les classes énergétiques des bâtiments modélisés.

3.1. MODELISATION DU PARC

L'OPHM a mis en avant deux quartiers à rénover prioritairement (dans les 5 ans) : les quartiers « Montreuil A1 » et « Clos Français », dont les caractéristiques sont données dans le Tableau 1.

Quartier	Nb. de bâtiments	Nb. de logements	% de logements dans des barres	% de logements dans des tours	DPE
Montreuil A1	15	579	85	15	E
Clos Français	6	581	87	13	D

Tableau 1 : Caractéristiques des deux quartiers réels.

Pour limiter le nombre de bâtiments à simuler, trois bâtiments ont été retenus sur ces deux quartiers pour la constitution du parc virtuel : une barre et une tour dans le quartier « Montreuil A1 » et une barre dans le quartier « Clos Français ». Dans les quartiers étudiés, deux orientations sont possibles pour les barres (selon un axe est-ouest ou nord-sud). Pour prendre en compte ces deux orientations, 5 typologies de bâtiments, basés sur 3 bâtiments réels, sont retenues pour la constitution du quartier virtuel. Afin de réduire la combinatoire dans cette étude, un parc virtuel de 7 bâtiments est finalement proposé comme illustré dans le Tableau 2. Le nombre de bâtiments de chacune des 5 typologies a été défini de manière à respecter autant que possible, d'une part le ratio de logements de type E à l'échelle de l'OPHM (45 % selon les DPE) et d'autre part, le ratio de logements dans des tours pour le quartier « Montreuil A1 ».

Quartier d'origine	Typo	Orientation	Nb. de bâtiments	Nb. de logements	Surface [m ²]	Année de construction	Isolation murs	DPE
Montreuil A1	Barre	E-O	2	120	3 030	1964	Aucune	E
	Barre	N-S	1	60	3 030			E
	Tour	-	1	29	1 910			E
Clos Français	Barre	E-O	1	72	6 150	1957	5 cm d'isolant	D
	Barre	N-S	2	144	6 150			D

Tableau 2 : Caractéristiques du parc virtuel.

Chaque bâtiment du parc virtuel évolue de manière indépendante dans l'algorithme. Ainsi, les 2 barres E-O du quartier « Montreuil A1 », ne seront pas nécessairement rénovées de la même manière.

3.2. SCENARIOS DE RENOVATION ETUDIES

Les actions de rénovation et leurs coûts ont fait l'objet d'une collaboration avec un bureau d'études partenaire du projet. Pour chaque bâtiment, les quatre groupes d'actions connexes étudiés, correspondant à quatre gènes dans l'algorithme d'optimisation, sont décrits au Tableau 3. Une action connexe est un ensemble d'actions unitaires qu'il est opportun de mener conjointement dans le cadre d'une rénovation. Pour l'isolation des parois, trois niveaux de performances sont étudiés. Il s'agit de définir, pour chaque paroi, le coefficient U minimal pour obtenir un crédit d'impôt CITE (performance minimale), pour respecter la RT 2012 ou encore le label *EnerPHit* (performance maximale). Enfin, pour le gène 4, la

variante « pas de rénovation » n'est pas étudiée sur la production de chauffage et d'ECS, du fait de la nécessité de remplacer les chauffe-bains non étanches actuellement installés dans les logements.

Gène	Action connexe	Action unitaire	Nb. allèles
1	→ Isolation des murs par l'extérieur	→ 3 niveaux de performance & 2 revêtements (enduit + bardage)	12 + 1
	→ Remplacement des fenêtres	→ Double vitrage uniquement	
	→ Ventilation	→ Simple flux (SF) ou Double flux (DF) → pas de rénovation pour le gène 1	
2	→ Isolation du plancher haut	→ 3 niveaux de performance → pas de rénovation pour le gène 2	3 + 1
3	→ Isolation du plancher bas	→ 3 niveaux de performance → pas de rénovation pour le gène 3	3 + 1
4	→ Production de chauffage et d'ECS	→ 3 cas : <i>Light</i> : chauff. : désembouage + équilibrage + robinets thermo. & ECS : nouvelle production gaz ; <i>Prod. Gaz</i> : chauff. & ECS : nouvelle production gaz ; <i>RCU</i> : chauff. & ECS raccordement au réseau de chaleur urbain (RCU)	3

Tableau 3 : Actions connexes de rénovation étudiées pour chaque bâtiment.

Compte-tenu du nombre d'allèles par gène, du nombre de bâtiments du parc et d'un échelonnement des travaux sur 5 ans, la combinatoire du problème d'optimisation est de 1,37E39.

3.3. OBJECTIFS ET CONTRAINTES

Deux objectifs d'optimisation sont pris en compte : il s'agit du coût d'investissement pour les travaux ainsi que de la consommation d'énergie finale du parc pour le chauffage (cumulée sur une durée d'étude de 20 ans). Cinq contraintes de financement pluriannuelles (budget à ne pas dépasser à chacune des 5 années de travaux) et une contrainte globale (budget à ne pas dépasser au terme des 5 ans) sont intégrées dans certaines variantes d'optimisation. Dans le cas où le budget d'une année ne serait pas dépensé, celui-ci est reporté sur l'année suivante. Des indicateurs complémentaires (ex. confort estival après rénovation) sont aussi calculés pour être utilisés dans le processus d'aide au choix des séquences.

Pour valider l'outil et à titre pédagogique, plusieurs optimisations, de complexités croissantes, ont été réalisées. Elles sont décrites dans le Tableau 4. Chacune contient 1 500 générations de 260 individus et est réalisée en 72 h environ pour un ordinateur portable de 4 cœurs (processeur i7-6850U de 1,9 Ghz).

	Travaux sur :	Objectifs	Contraintes de financement
Optim. 1	1 an	Energie + Invest.	Non
Optim. 2	5 ans	Energie + Invest.	Non
Optim. 3A	5 ans	Energie + Invest.	Oui : assez de budget pour rénover tout le parc
Optim. 3B			Oui : pas assez de budget

Tableau 4 : Plan d'expérience des optimisations menées.

4. RESULTATS

4.1. REALISATION DE TOUS LES TRAVAUX EN UNE ANNEE (OPTIM. 1)

Cette optimisation permet d'identifier les stratégies de rénovation optimales pour un parc, sans séquençage des travaux dans le temps. Pour évaluer la convergence des résultats, les évolutions du front de Pareto et d'un indicateur de performance, l'hypervolume (Knowles et Corne, 2002), ont été observées génération après génération. Même si ces indicateurs évoluent de plus en plus lentement, l'hypervolume

continue d'augmenter, montrant que la convergence n'est pas complètement atteinte. Les caractéristiques du dernier front de Pareto sont présentées dans le Tableau 5.

DPE avant travaux	Coût d'investissement [€/log.]			Consommation en énergie finale [kWh/m ²]		
	Min.	Médian	Max.	Min.	Médiane	Max.
D	7 900	10 000	48 500	10	148	168
E	2 700	19 400	30 700	7	40	212

Tableau 5 : Caractéristiques du dernier front de Pareto (génération 1 500).

Une étude statistique sur les actions de rénovation des individus optimaux est ensuite menée. Pour l'ensemble des stratégies optimales sur le parc, les parts de rénovation par action et par bâtiment sont présentées à la Figure 3. Dans cette figure, une couleur différente est utilisée pour chaque action unitaire. Chaque groupe de 7 barres représente un type d'action (ex. : nuance de bleu pour les actions sur la ventilation). Dans les groupes de 7 barres, une barre représente un bâtiment du parc. Il ressort de ces résultats que le revêtement choisi est toujours l'enduit et que la source de chaleur préférée pour le chauffage et l'ECS est le RCU. Cela s'explique par les coûts plus bas de ces actions. Pour les murs, l'épaisseur d'isolant minimale (CITE), moins chère, est préférée alors que les 3 niveaux de performance sont très représentés pour les sols et toits. Les murs et sols (gènes 1 et 2) des bâtiments initialement de classe E (4 dernières barres) sont plus souvent rénovés que ceux des classes D ; ce qui permet de faire diminuer davantage la consommation énergétique du parc pour un coût d'investissement plus faible (les surfaces déperditives des classes D étant supérieures à celles des classe E). Cette tendance est presque inversée pour les toits du fait de la différence sur les épaisseurs et types d'isolant à installer pour la rénovation des toits-terrasses (des classes D) et des combles perdus (des classes E). Pour améliorer les performances des classes D, l'installation d'une VMC DF est préconisée. Enfin, pour un même type de bâtiment (ex. : Barre Clos Français), le choix de l'orientation influence les stratégies de rénovation.

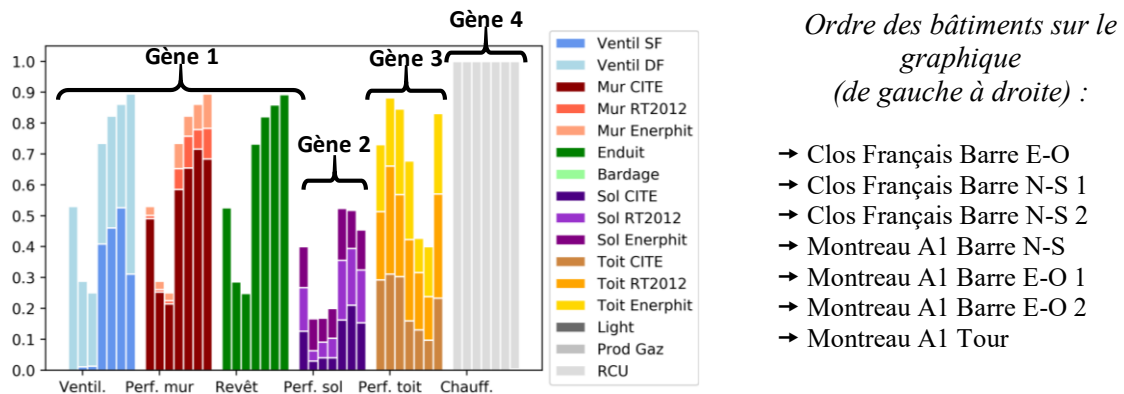


Figure 3 : Part des actions unitaires de rénovation sur chacun des bâtiments.

4.2. SEQUENÇAGE DES TRAVAUX SUR 5 ANS, SANS CONTRAINTES (OPTIM. 2)

Lorsque les travaux sont échelonnés sur 5 ans et que le budget est illimité, les mêmes tendances que dans le cas précédent devraient être identifiées. C'est ce qui est globalement observé à la Figure 4. Les rénovations des murs sont toutefois moins fréquentes et le niveau de performance des murs après rénovation n'est pas aussi souvent le niveau CITE. De plus, pour cette optimisation, l'algorithme devrait favoriser la réalisation des travaux au cours de la première année pour minimiser la consommation énergétique cumulée sur les 20 ans d'étude. La Figure 5, qui représente les parts des 6 types d'actions de rénovation réalisées chaque année pour l'ensemble des bâtiments, montre que la majorité des travaux sont effectivement réalisés au cours de la première année. Les écarts par rapport aux résultats attendus s'expliquent par le nombre insuffisant de générations réalisées : la convergence n'a donc pas été atteinte.

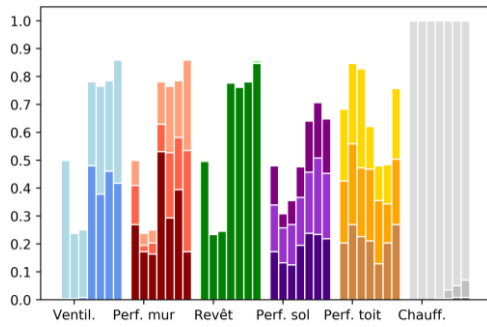


Figure 4 : Part des actions unitaires de rénovation sur chacun des bâtiments.

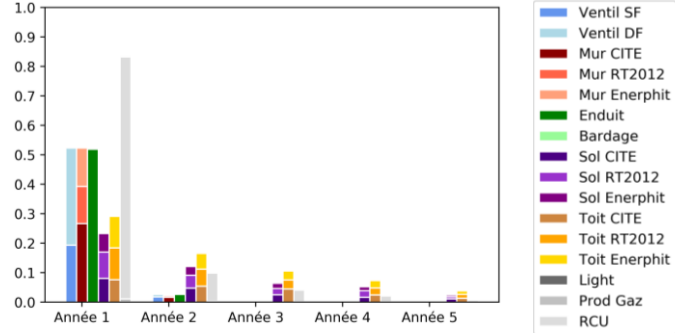


Figure 5: Part des actions de rénovation menées chaque année.

4.3. SEQUENÇAGE DES TRAVAUX SUR 5 ANS, AVEC CONTRAINTES (OPTIM. 3A ET 3B)

L’objectif de ces deux optimisations est d’évaluer l’effet de la prise en compte de contraintes de financement pluriannuelles et globales sur la répartition des travaux de rénovation dans le temps. Dans la première optimisation, 3A, le budget est suffisant pour rénover tout le parc et l’amener à la meilleure performance énergétique. Le cas 3B est plus réaliste, seul 50 % du budget total est disponible. Dans les deux cas, le budget annuel correspond à 1/5^{ème} du budget total. Les résultats des deux optimisations sont présentés aux Figures 6 et 7. La prise en compte de contraintes tend à faire diminuer le nombre de rénovations liées au gène 1 (actions connexes les plus coûteuse), en particulier pour les bâtiments initialement de classe D, et lorsque les contraintes budgétaires sont fortes (3B). Lorsque le budget total est disponible (3A), la production de chaleur est modifiée dès la première année pour presque tous les bâtiments. Les rénovations sont ensuite échelonnées dans le temps mais sont réalisées dès que le budget le permet (années 1, 2 et 3). Lorsque le budget n’est pas suffisant, les travaux sont rééchelonnés, mais le changement de la production de chaleur reste prioritaire. L’étude de la corrélation entre bâtiments et années de travaux (non visibles au travers des seules Figures 6 et 7) montre que les murs des bâtiments de classe E sont rénovés avant ceux de classe D.

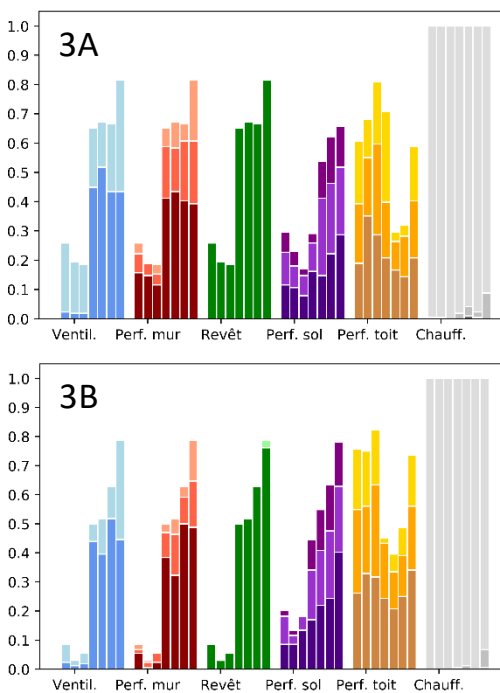


Figure 6 : Part des actions unitaires de rénovation sur chacun des bâtiments.

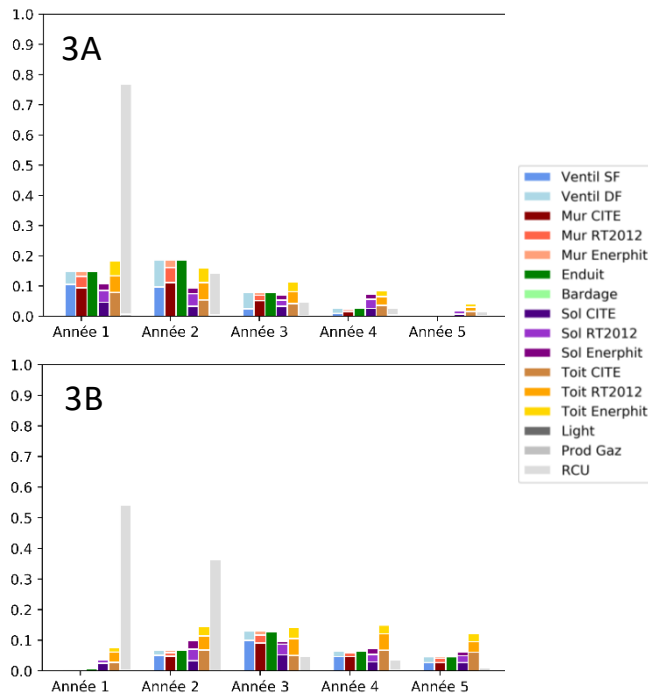


Figure 7: Part des actions de rénovation menées chaque année.

5. DISCUSSION

Le parc virtuel a été construit, à partir de bâtiments réels représentatifs en termes de morphologies (tour/barre) et de classes énergétiques (D/E). Toutefois, d'autres critères pourraient être pertinents pour choisir les bâtiments représentatifs (année de construction, système constructif...). Une approche par identification de *clusters* est étudiée afin d'améliorer la modélisation des parcs (Rivallain et al. 2019).

Le gène 1 regroupe plusieurs types d'actions (isolation, revêtement, fenêtres et ventilation) pouvant prendre chacun plusieurs valeurs (bardage et enduit pour le revêtement). Toutes ces actions sont corrélées, c'est pourquoi elles sont regroupées dans un même gène. Il existe toutefois également une hiérarchie entre ces actions (l'enduit ne concerne que le revêtement). La représentation de ce type de gènes pourrait alors être améliorée en ajoutant par exemple, un niveau de détail entre gènes et allèles.

Les séquences de rénovation optimales identifiées sont transmises à un outil d'aide à la décision interactif (Delhomme et al. 2020) pour faciliter la concertation entre acteurs et permettre le choix d'une stratégie en se basant sur les critères de l'optimisation et des critères complémentaires (sociaux, ...).

6. CONCLUSION

Cet article a présenté les spécificités d'un outil d'optimisation, destiné à aider les gestionnaires de parcs à choisir dans quels bâtiments et dans quelles actions de rénovation investir en priorité. Dans le cas d'un parc virtuel de sept bâtiments, représentatif d'un parc réel, cet outil a montré qu'il était préférable de rénover tout d'abord les bâtiments les moins performants énergétiquement. Le raccordement au RCU de la ville est également une action prioritaire. Au-delà des résultats propres à ce cas d'étude, l'outil a montré son aptitude à identifier des séquences de réhabilitation optimales pour un parc. Il pourra par la suite être utilisé pour définir les actions à mener sur le cas d'un parc plus conséquent, plus réaliste en terme de typologie et intégrant d'autres objectifs de rénovation.

7. REMERCIEMENTS

Ce travail a été réalisé dans le cadre du projet ANR REHA-PARCS. Les auteurs souhaitent remercier tout particulièrement le bureau d'études ITF, devenu OTEIS, partenaire du projet, et la société *Kocliko*.

8. BIBLIOGRAPHIE

- Deb, K., A. Pratap, S. Agarwal, et T. Meyarivan. 2002. « A fast and elitist multiobjective genetic algorithm: NSGA-II ». *IEEE Transactions on Evolutionary Computation* 6 (2): 182-97.
- Delhomme, B., F. Taillandier, L. Mora, T. Recht, et M.L. Pannier. 2020. « Couplage de l'argumentation abstraite et de l'analyse multicritère pour la co-construction d'une stratégie de réhabilitation d'un parc de bâtiments ». In *IBPSA France 2020*, 8. Reims.
- Knowles, J. et D. Corne, 2002. « On metrics for comparing nondominated sets ». In *Proceedings of the 2002 Congress on Evolutionary Computation*. Honolulu.
- Peuportier, B., et I. Blanc-Sommereux. 1990. « Simulation tool with its expert interface for the thermal design of multizone buildings ». *International Journal of Solar Energy* 8 (2): 109-120.
- Recht, T. 2016. « Étude de l'écoconception de maisons à énergie positive ». Thèse de doctorat, Paris: École nationale supérieure des mines de Paris. <https://www.theses.fr/2016PSLEM024>.
- Rivallain, M., 2013. « Étude de l'aide à la décision par optimisation multicritère des programmes de réhabilitation énergétique séquentielle des bâtiments existants ». Thèse de doctorat, Université Paris Est. <http://www.theses.fr/2013PEST1038>.
- Rivallain, M., S. Agapoff, P. Boisson, A. Fouquier, et Y. Lee. 2019. « Clustering as a simplification tool for the decision-making process on building stock renovation ». In *BS 2019*, 8. Rome.