

# Etude de la consommation énergétique et de l'impact environnemental des patinoires artificielles suisses et perspectives pour des pistes de glace bas carbone

---



Source: [www.arcinfo.ch](http://www.arcinfo.ch), 2022

## **Auteurs**

Massimiliano Capezzali, HEIG-VD

Nicolas Weber, HEIG-VD

Erika Prina Howald, HEIG-VD

Carine Muster, HEIG-VD

Nathan Martin, HEIG-VD

Gauthier Demonchy, HEIG-VD

Gabriel Dupont, HEIG-VD

La présente étude a été élaborée pour le compte de SuisseEnergie.  
La responsabilité du contenu incombe exclusivement aux auteurs.

# Sommaire

Liste des abréviations .....	5
Résumé .....	6
Zusammenfassung .....	7
Riassunto .....	8
1 Introduction.....	9
2 Etat des lieux des patinoires actuelles .....	10
2.1 Génie civil .....	10
2.1.1 Lonza Arena, Viège (VS) .....	11
2.1.2 Vaudoise Arena, Prilly (VD) .....	11
2.1.3 Raiffeisen Arena, Porrentruy (JU).....	12
2.1.4 Patinoire du Littoral, Neuchâtel (NE) .....	13
2.1.5 Synthèse des observations sur quatre patinoires existantes.....	14
2.1.6 Matériaux de construction .....	17
2.2 Installations énergétiques et stratégie de régulation .....	20
2.2.1 Dalle de glace.....	21
2.2.2 Production de froid .....	23
2.2.3 Chauffage et ECS .....	25
2.2.4 Ventilation et déshumidification.....	26
2.2.5 Éclairage .....	27
2.2.6 Puits de fonte de glace.....	28
2.3 Synergies .....	29
2.4 Monitoring.....	29
3 Modélisation d'une patinoire type.....	30
3.1 Paramètres de la simulation.....	30
3.1.1 Emplacement et climat de référence .....	30
3.1.2 Géométrie.....	30
3.1.3 Composition de la structure .....	31
3.1.4 Occupation de la patinoire .....	31
3.1.5 Eclairage .....	32
3.1.6 Occupants .....	32
3.1.7 Ventilation et débit d'air thermiquement actif.....	32
3.1.8 Modélisation de la dalle de glace .....	32
3.2 Résultats de la patinoire type.....	33
3.2.1 Résultats génériques .....	33
3.2.2 Température dans l'enceinte de la patinoire.....	34
3.2.3 Influence d'un match sur la patinoire .....	35
3.2.4 Besoin énergétique mensuel.....	36
3.2.5 Besoin énergétique selon le climat .....	37

4	Options d'optimisations avec calculs de leur impact.....	38
4.1	Génie civil.....	38
4.1.1	Isolants biosourcés .....	38
4.1.2	Vide sanitaire sous la dalle de glace.....	39
4.2	Installations énergétiques .....	39
4.2.1	Production de froid .....	39
4.2.2	Chauffage et ECS .....	44
4.2.3	Ventilation et déshumidification.....	45
4.2.4	Eclairage haute-efficacité.....	47
4.3	Synthèse des optimisations .....	48
4.4	Synergies .....	50
5	Conclusions.....	51
Annexes	.....	52

## Liste des abréviations

IIHF	International Ice Hokey Federation
XPS	Polystyrène extrudé
HFC	Hydrofluorocarbure
HCFC	Hydrochlorofluorocarbure
HFO	Hydrofluoroléfine
PAC	Pompe à chaleur
COP	Coefficient de performance
ECS	Eau chaude sanitaire
EPS	Polystyrène expansé
KBOB	Koordinationskonferenz der Bau- und Liegenschaftsorgane der öffentlichen Bauherren

# Résumé

Ce document présente une vision globale des défis liés à l'efficacité énergétique et la durabilité dans le design, la construction et l'exploitation des patinoires suisses. Un accent particulier est mis sur l'identification des systèmes énergétiques critiques d'une patinoire pouvant accueillir des matchs de ligue nationale et les possibilités pour améliorer leurs performances.

Plusieurs patinoires helvétiques, en particulier la Vaudoise Arena (Prilly), la Raiffeisen Arena (Porrentruy), la Lonza Arena (Viège) et la Patinoire du Littoral (Neuchâtel) ont été étudiées dans le but de construire un modèle de patinoire plausible. En raison de la différence importante dans la typologie de ces grandes patinoires et de leur annexe, ainsi que des données de monitoring parcellaire, une comparaison systématique de leur performance énergétique n'a pas été possible.

En conséquence, l'étude des consommations énergétiques et de leurs potentiels d'optimisation est basée exclusivement sur un modèle et validée avec des données disponibles des différentes patinoires étudiées ainsi que les résultats d'une étude suédoise de la Fédération internationale de hockey sur glace (IIHF).

Le modèle propose les bases d'un agencement minimisant au maximum les flux thermiques indésirables entre les zones d'une patinoire et identifie plusieurs éléments architecturaux ayant un impact sur l'empreinte écologique d'une patinoire lors de sa construction et de son exploitation. Ce modèle est ensuite utilisé pour une simulation dynamique dans IDA-ICE des pertes et besoins thermiques de la patinoire. Ces résultats ainsi que des calculs de systèmes énergétiques permettent d'établir une consommation électrique d'une patinoire partiellement optimisée et représentant de manière crédible celles existantes en Suisse depuis plusieurs décennies.

Les résultats permettent d'identifier les consommations nécessaires afin de produire et maintenir la glace, éclairer la patinoire, la ventiler, chauffer et climatiser. Le choix du réfrigérant utilisé pour les machines frigorifiques est identifié comme facteur pour l'exploitation efficace d'une patinoire. En effet, un choix judicieux permet de couvrir entièrement les besoins de chaleur d'une patinoire avec les rejets de chaleur des machines frigorifiques et ainsi, avec quelques autres optimisations, de réduire jusqu'à 40% de la consommation énergétique suivant la situation initiale. Plusieurs pistes afin de valoriser au mieux la chaleur fatale liée à l'exploitation des patinoires sont également identifiées, en particulier les synergies avec les piscines et les réseaux d'énergie.

# Zusammenfassung

Dieses Dokument verschafft dem Leser einen umfassenden Überblick über Wahlmöglichkeiten, Schweizer Eisenbahnen energieeffizient und nachhaltig zu planen, zu bauen und zu betreiben. Ein besonderer Schwerpunkt liegt auf der Identifizierung wichtigster Energieversorgungssysteme von Eisbahnen, die Spiele der National League empfangen können, sowie auf den Optionen, diese effizienter auszulegen und zu betreiben.

Mehrere Schweizer Eisbahnen, insbesondere die Vaudoise Arena (Prilly), die Raiffeisen Arena (Porrentruy), die Lonza Arena (Visp) und die Patinoire du Littoral (Neuenburg), wurden untersucht, um ein repräsentativen Eisbahnmodell zu erstellen. Aufgrund der erheblichen Unterschiede in der Typologie dieser großen Eisbahnen und ihrer Nebengebäude sowie der zum Teil fehlenden Monitoring-Daten war ein systematischer Vergleich ihrer Energieeffizienz nicht möglich.

Daher basiert die Untersuchung des Energieverbrauchs und ihrer Optimierungspotenziale ausschließlich auf einem Modell und wird mit verfügbaren Daten aus den verschiedenen untersuchten Eisbahnen sowie den Ergebnissen einer schwedischen Studie der Internationalen Eishockey-Föderation (IIHF) verglichen und validiert.

Das Modell schlägt Grundlagen für eine Minimierung unerwünschter Wärmeströme zwischen den Bereichen einer Eisbahn vor und identifiziert mehrere Bauaspekte, die sich auf den ökologischen Fußabdruck einer Eisbahn während ihrer Planung, Bau und Betriebs auswirken. Dieses Modell wird anschließend für eine dynamische Simulation der Wärmeverluste und -bedarfe der Eisbahn in IDA-ICE verwendet.

Die Ergebnisse der IDA-ICE Simulation sowie der Berechnungen der Energieversorgungssysteme ermöglichen eine Schätzung des Stromverbrauchs einer teilweise optimierten Eisbahn, die glaubwürdig diejenigen repräsentiert, die seit mehreren Jahrzehnten in der Schweiz existieren. Die Ergebnisse ermöglichen es, die erforderlichen Energieverbräuche zur Herstellung und Aufrechterhaltung des Eises, zur Beleuchtung, Belüftung, Heizung und Klimatisierung der Eisbahn zu quantifizieren. Die Auswahl des Arbeitsmittels für die Kältemaschinen wird als entscheidender Faktor für den effizienten Betrieb einer Eisbahn identifiziert. Eine gezielte Auswahl des Arbeitsmittels ermöglicht die gesamten Wärmebedürfnisse einer Eisbahn mit der Abwärme der Kältemaschinen abzudecken und somit zusammen mit einigen anderen Optimierungen eine Reduzierung des Energieverbrauchs um bis zu 40% je nach Ausgangssituation zu erreichen. Mehrere Möglichkeiten zur optimalen Nutzung der überflüssigen Abwärme aus dem Betrieb von Eisbahnen werden ebenfalls identifiziert, insbesondere Synergien mit Schwimmbädern und Fernwärmenetzen.

## Riassunto

Questo documento presenta una panoramica delle sfide associate all'efficienza energetica e alla sostenibilità nella progettazione, costruzione e gestione delle piste di ghiaccio svizzere. In particolare, si pone l'accento sull'identificazione dei sistemi energetici critici di una pista di ghiaccio in grado di ospitare partite di campionato nazionale e sulle possibilità di migliorarne le prestazioni.

Sono state studiate diverse piste di ghiaccio svizzere, in particolare la Vaudoise Arena (Prilly), l'Arena Raiffeisen (Porrentruy), l'Arena Lonza (Visp) e la Patinoire du Littoral (Neuchâtel), con l'obiettivo di costruire un modello plausibile di pista di ghiaccio. A causa delle notevoli differenze nella tipologia di queste grandi piste di pattinaggio e degli edifici associati, nonché dei dati di monitoraggio parziali, non è stato possibile effettuare un paragone sistematico delle loro prestazioni energetiche.

Di conseguenza, lo studio del consumo energetico e del suo potenziale di ottimizzazione si basa esclusivamente su un modello e viene convalidato con dati disponibili provenienti dalle varie piste di pattinaggio studiate, oltre che con i risultati di uno studio svedese della Federazione internazionale di hockey su ghiaccio (IIHF).

Il modello propone le basi per un layout che minimizzi i flussi di calore indesiderati tra le zone di una pista di ghiaccio e identifica diversi elementi architettonici che hanno un impatto sull'impronta ecologica di una pista di ghiaccio durante la sua costruzione e il suo funzionamento. Questo modello viene poi utilizzato per una simulazione dinamica in IDA-ICE delle perdite e dei requisiti termici della pista di pattinaggio. Questi risultati, insieme ai calcoli dei sistemi energetici, ci permettono di stabilire il consumo di elettricità di una pista di ghiaccio parzialmente ottimizzata, che rappresenta in modo credibile quelle esistenti in Svizzera da diversi decenni.

I risultati consentono di individuare i consumi necessari per produrre e mantenere il ghiaccio, illuminare la pista, ventilarla, riscaldarla e raffreddarla. La scelta del refrigerante utilizzato per le macchine frigorifere è stata identificata come un fattore di efficienza del funzionamento di una pista di ghiaccio. Con la scelta giusta, il fabbisogno di calore di una pista di ghiaccio può essere interamente coperto dal calore residuo delle macchine frigorifere e, con alcune altre ottimizzazioni, il consumo energetico può essere ridotto del 40%, a seconda della situazione iniziale. Sono stati inoltre individuati diversi modi per sfruttare al meglio il calore residuale generato dal funzionamento delle piste di ghiaccio, in particolare le sinergie con le piscine e le reti di anergia.

# 1 Introduction

Les patinoires artificielles font partie de la vie sportive, récréative et touristique suisse. Elles constituent de fait des centres sociaux fondamentaux des grandes comme des petites agglomérations du pays.

Toutefois, les patinoires artificielles engendrent une consommation énergétique importante liée non seulement à la fabrication et au maintien d'une glace de qualité, mais aussi à d'autres services telles que les douches pour les sportifs(-ives), la restauration ou encore la déshumidification de l'air ambiant. Les bâtiments qui les accueillent sont ainsi des lieux qui voient la présence simultanée de plusieurs flux énergétiques que l'on pourrait définir de « contradictoires » et ne sont, le plus souvent, pas optimisés par design pour assurer une efficacité énergétique maximale.

Comme pour toutes les activités énergivores, il est donc fondamental de pouvoir faire d'abord un état des lieux détaillé. Ce dernier permet ensuite de proposer des approches visant une réduction de la consommation énergétique pour tous les systèmes présents, ainsi qu'identifier de possibles synergies internes ou externes. Globalement, l'ensemble des actions proposées conduit donc à une réduction de l'impact environnemental des patinoires artificielles et donc des territoires qui les accueillent.

Sur cette base, cette étude caractérise de la manière la plus précise possible la consommation énergétique des patinoires artificielles suisses, au niveau de tous les éléments qui les constituent : fabrication et maintien de la glace, installations sanitaires et vestiaires, locaux techniques, espaces publics, gestion des flux d'eau, etc. Elle se base sur une sélection de patinoires existantes, en proposant une approche systémique qui unit le génie civil et les technologies énergétiques, notamment par le biais d'outils de simulation. Enfin, des perspectives d'améliorations sont proposées et quantifiées dans tous les domaines, afin de viser des économies d'énergies qui peuvent être substantielles.

## 2 Etat des lieux des patinoires actuelles

Ce chapitre aborde quatre aspects des patinoires actuelles :

- Leur agencement et les matériaux de construction dans la partie 2.1 Génie civil
- Les infrastructures énergétiques principales et leur fonctionnement dans la partie 2.2 Installations énergétiques et stratégie de régulation
- Les interactions possibles entre systèmes énergétiques au sein d'une patinoire ou avec d'autres installations attenantes dans la partie 2.3 Synergies
- L'état des lieux au niveau du monitoring énergétique actuellement pratiqué dans les patinoires étudiées dans la partie 2.4 Monitoring.

Pour chacun des quatre aspects abordés pour ce chapitre, un état des lieux des pratiques actuelles sera présenté, de manière plus ou moins approfondie selon l'importance de l'aspect en question du point de vue de l'exploitation durable d'une patinoire ainsi que des données disponibles. Cet état des lieux servira également à poser les bases de la simulation énergétique d'une patinoire type au chapitre 3, ainsi que poser les bases des différentes pistes d'améliorations évaluées au chapitre 4.

### 2.1 Génie civil

Pour cerner les enjeux relatifs à la construction d'une patinoire, quatre patinoires existantes ont été étudiées : La Lonza Arena (Viège), la Vaudoise Arena (Prilly), la Raiffeisen Arena (Porrentruy) et la Patinoire du Littoral (Neuchâtel). A l'exception de la Patinoire du Littoral, qui a été construite en 1986, ce sont des patinoires modernes conceptualisées et construites entre 2015 et 2020. Les objectifs de l'étude et de la comparaison de trois patinoires modernes et une d'une quarantaine d'années sont de déterminer l'existence ou l'absence de similarités dans l'agencement de leurs différents volumes ainsi que les matériaux de construction utilisés pour les différents éléments de leur structure.

Quatre catégories de volumes communs à toutes les patinoires ont ainsi pu être établies :

- Les volumes refroidis
- Les volumes chauffés
- Les volumes tempérés
- Les volumes ni chauffés ni refroidis

Les volumes refroidis contiennent la glace et les gradins, autour desquels tous les autres volumes des patinoires sont généralement agencés.

Les volumes chauffés regroupent toutes les pièces devant être chauffées en hiver, tels que les vestiaires, restaurants, toilettes, salles de presse et de conférence, bureaux, etc.

Les locaux tempérés nécessitent des besoins de froid et/ou de chaleur selon leur type et utilisation, afin de garantir une température acceptable tout au long de l'année. Il s'agit de locaux ayant des installations dégageant des quantités significatives de chaleur et/ou d'humidité, tels que les vestiaires publics (douches), les locaux techniques (installation énergétique) ou encore le dépôt à patins (patins humides), entrée (pics d'affluence, courant d'air en raison des portes ouvertes).

Les locaux ni chauffés ni refroidis sont les ateliers et parkings, pour lesquels la température n'est pas importante pour leur utilisation.

### 2.1.1 Lonza Arena, Viège (VS)

Cette patinoire couverte située dans le canton du Valais a été construite en 2018 en visant le standard minergie pour patinoires et ouverte en 2019 avec une capacité de 5'150 places. Elle est composée de cinq étages : deux en sous-sol et trois en surface. Le niveau de la glace se situe au rez-de-chaussée et rien n'est construit sous la glace. Les vestiaires pour hockeyeurs, arbitres et club de patinage se situent au premier sous-sol avec les locaux techniques, une salle de fitness et une salle de massage. Il n'y a que des locaux techniques au deuxième sous-sol. Au rez-de-chaussée, autour de la glace et sous les gradins de premier étage, se trouvent les ateliers dont celui de la Rolba, les vestiaires publics, le stock des patins, les ateliers, les WC publics, les buvettes, un bar, l'infirmerie et une zone de livraison. Au premier étage se trouvent des salles de conférences et de presses, des bureaux et autres locaux divers. Finalement, le deuxième étage est occupé par la zone VIP ainsi que les infrastructures multimédia.



Figure 1: Extérieure (à gauche) et intérieure (à droite) de la Lonza Arena (Source : [www.batidoc.ch](http://www.batidoc.ch))

Les principaux matériaux de construction utilisés sont du béton (armé) pour la structure porteuse et les dalles. Comme le montre la Figure 1, les façades sont composées de grandes baies vitrées pour la partie inférieure, apportant ainsi de la lumière aux volumes sous les gradins, et de sandwich Montanatherm pour la partie supérieure. La toiture est construite avec une structure en acier supportant des panneaux sandwich comme ceux en partie supérieure de façade.

### 2.1.2 Vaudoise Arena, Prilly (VD)

En service depuis 2019, la Vaudoise Aréna a été conceptualisée en 2015, avec trois glaces, dont deux pour les compétitions avec une capacité respective de 9600 spectateurs et 300 spectateurs et une en extérieur. De plus, le bâtiment abrite également trois bassins de natation dont un de dimensions olympiques. Elle est également construite sur cinq niveaux, dont deux en sous-sol. Le deuxième sous-sol abrite les deux glaces intérieures ainsi qu'un atelier à Rolba et plusieurs vestiaires et locaux techniques. Au premier sous-sol se trouvent davantage de vestiaires et les loges VIP de la patinoire principale. Le rez-de-chaussée est composé de l'entrée principale, les caisses, d'une buvette, un restaurant, les WC publics ainsi que des loges. Le premier étage accueille des espaces VIP et la tribune de presse.

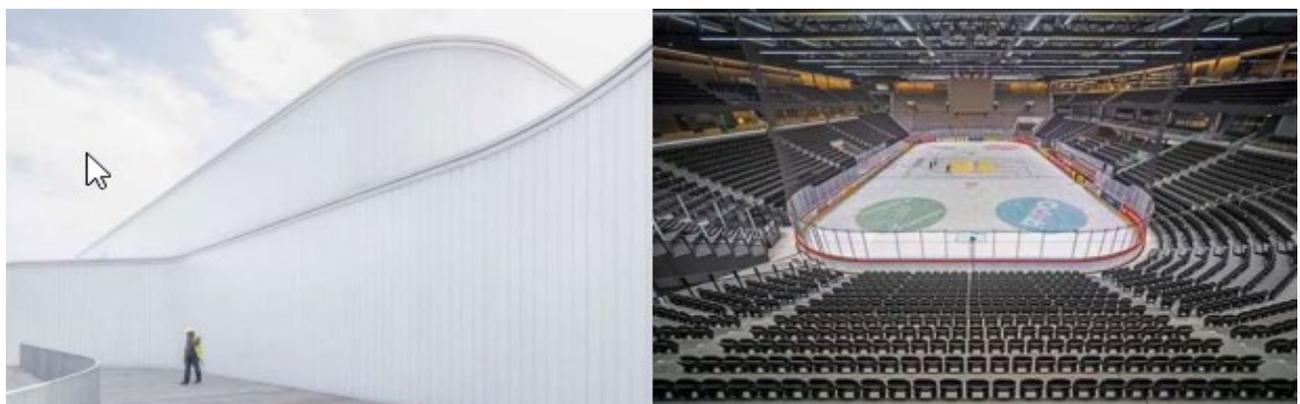


Figure 2: Enveloppe en verre "Profilit" (à gauche) et intérieur de la Vaudoise Arena (à droite) (Source: [www.lausanne.ch](http://www.lausanne.ch))

La structure porteuse est réalisée en béton armé précontraint. Les gradins et les dalles de petites portées reposent sur la structure porteuse pour descendre les charges verticales de la toiture jusqu'aux fondations, le tout réalisé en béton. En raison de sa très grande portée, la toiture est formée de poutres triangulées en acier. Des dalles nervurées, précontraintes ou non, sont utilisées pour les dalles de portée moyenne. L'enveloppe, visible sur la Figure 2, est composée d'un verre « Profilite » permettant de gérer la lumière naturelle.

### 2.1.3 Raiffeisen Arena, Porrentruy (JU)

La Raiffeisen Aréna a été conceptualisée en 2017 et réalisée en 2018, avec une capacité de 2400 places. Elle se trouve sur le site occupé auparavant par une patinoire de 1972, qui a dû être rénovée, agrandie et modernisée afin d'accueillir l'équipe de hockey d'Ajoie et se conformer aux nouvelles normes de sécurité. Comme la Vaudoise Arena, le site dispose de deux surfaces de glace, à la différence que la glace secondaire se trouve dans une structure annexe. Les fondations ainsi que le rez-de-chaussée abritant la glace, les vestiaires pour hockeyeurs, un restaurant et des WC publiques, n'ont pas été modifiés pendant le projet de modernisation. Un demi-étage en dessous du restaurant se trouvent les vestiaires des clubs de patinage et de curling. Quant aux niveaux hors-sols, ils comprennent les gradins, espaces VIP et zone de presse.

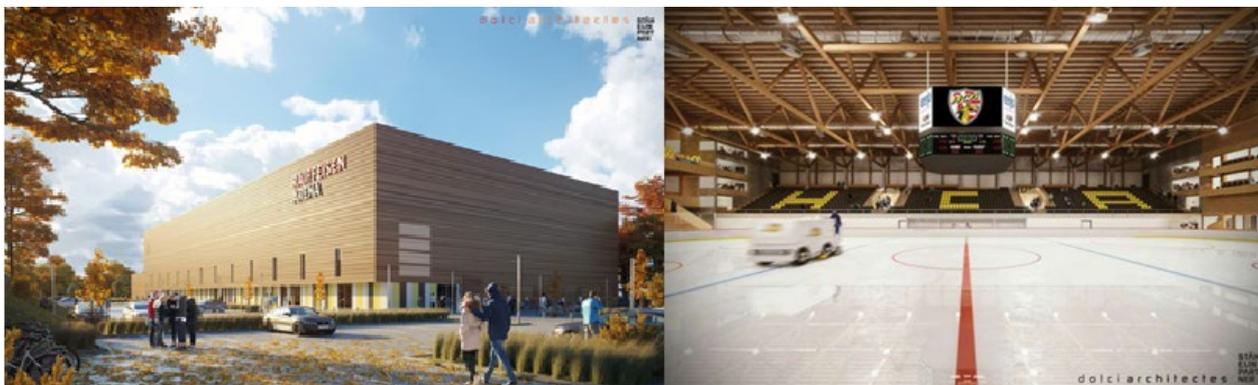


Figure 3: Extérieur (à gauche) et intérieur (à droite) de la Raiffeisen Arena (Source : [www.hc-ajoie.ch](http://www.hc-ajoie.ch))

Une particularité de cette patinoire est l'utilisation de bois comme principal matériau de construction, comme le montre la Figure 3. La structure, les murs et la toiture sont réalisés en frêne lamellé-collé (GL 48). Le hêtre a été utilisé dans les zones chauffées, en raison des variations d'humidité plus importantes. Les éléments en béton déjà présents au niveau de la glace et des fondations n'ont pas été modifiés pendant les travaux.

## 2.1.4 Patinoire du Littoral, Neuchâtel (NE)

La plus ancienne des patinoires étudiées dans le cadre de ce rapport a été conceptualisée en 1978, puis réalisée en 1986, avec une capacité de 6000 spectateurs. Tout comme la patinoire de la Vaudoise Aréna, elle accueille non seulement des sports de glace, mais également des concerts, expositions, spectacles, etc. Étant donné sa situation, au bord du Lac de Neuchâtel, elle ne dispose d'aucun niveau en sous-sol. Au rez-de-chaussée, la glace est entourée de différents locaux, tels que les vestiaires, l'atelier pour la Rolba, les salles de presse et de conférence et une petite buvette. Le premier étage contient les gradins, qui sont entourés d'un long couloir et d'accès pour les spectateurs. Ce niveau est complété par les locaux techniques, des buvettes, WC et un restaurant. Au deuxième étage se trouve finalement la zone multimédia.



Figure 4: Vue aérienne (à gauche - Source: [www.arcinfo.ch](http://www.arcinfo.ch)) et intérieur de la patinoire du littoral (à droite - Source: [www.trip-advisor.ch](http://www.trip-advisor.ch))

Cette patinoire a été principalement construite avec des éléments préfabriqués en béton armé. Sa toiture, visible sur la Figure 4, de pente identique sur tous les versants, a une charpente en bois avec des tirants en acier, le tout recouvert de panneaux sandwich.

## 2.1.5 Synthèse des observations sur quatre patinoires existantes

L'analyse permet de déduire qu'il n'existe aucune ligne directrice sur l'emplacement et la construction des différents volumes, que ce soient des espaces chauffés ou non dans les patinoires existantes. L'emplacement de la Rolba et de l'atelier technique pour cette machine se situent proche de la glace au vu de son utilité. Pour les autres volumes, le choix a été laissé au bon vouloir du concepteur de la patinoire à l'aide des recommandations minimales de la Fédération internationale de hockey sur glace (IIHF). L'implantation géographique et la nature du sous-sol peuvent jouer un rôle, mais ne sont pas les facteurs principaux.

Sur la Figure 5, pour le niveau « glace » des quatre patinoire étudiées, les volumes ont été colorés selon le code couleur suivant :

- En bleu, les volumes refroidis
- En rouge, les volumes chauffés
- En vert, les volumes tempérés
- En jaune, les volumes ni chauffés ni refroidis



Figure 5: Plan des niveaux "glace" de la Raiffeisen Arena (en haut, à gauche), Patinoire du Littoral (en haut, à droite), Vaudoise Arena (en bas, à gauche) et Lonza Arena (en bas, à droite)

Il apparaît clairement que la logique d'agencement des volumes, du moins selon régulation thermique, est différente entre chaque patinoire, selon la forme du bâtiment, le nombre de glace, les utilisations annexes du site, par exemple la présence ou l'absence d'une piscine et l'emplacement du terrain qui impose certaines contraintes, par exemple l'emplacement des entrées. De plus, étant donné que la construction d'une patinoire est un grand projet, dont le design est en général mis au concours – ce qui a été le cas pour les quatre patinoires étudiées – certains aspects des bâtiments tels que la forme, va aussi dépendre d'aspects esthétiques influencés par les architectes soumettant des projets et les jurys, ce qui rendrait une standardisation des agencements encore plus compliquée. En résumé, chaque patinoire est agencée de manière unique.

L'emplacement des volumes chauffés sont situés au sous-sol, au niveau du rez-de-chaussée et aux étages. Il apparaît souvent que des volumes chauffés soient placés à proximité d'une zone refroidie ou d'un volume ni conditionné, ni tempéré. Cette situation peut engendrer des déperditions thermiques importantes, obligeant l'augmentation de production de chaleur ou de froid, donc de dépenses énergétiques et financières.

C'est la raison pour laquelle une réflexion quant à l'emplacement des différents volumes est importante, pouvant apporter des contraintes d'agencement difficiles, voire impossibles. De plus, la proximité ou l'éloignement de certains volumes est similaire entre les différentes patinoires. Par exemple, les vestiaires publics ont tendance à se trouver très proches de la glace, afin d'améliorer l'accès des visiteurs entre les vestiaires et la glace. Les vestiaires pour les professionnels se trouvent également proches de la glace, mais pas nécessairement au même étage. Un autre exemple est celui des tribunes et zones VIP, qui se situent généralement dans les étages supérieurs, d'où la vue sur la glace est meilleure.

Une analyse matricielle permet d'établir, sur la base d'observation des modèles de patinoires étudiés ainsi que la fonction des locaux, si deux locaux doivent idéalement se trouver proche l'un de l'autre, pas trop loin / moyennement éloigné ou si leur distance n'est pas importante et peuvent / devraient se trouver plus éloignés.

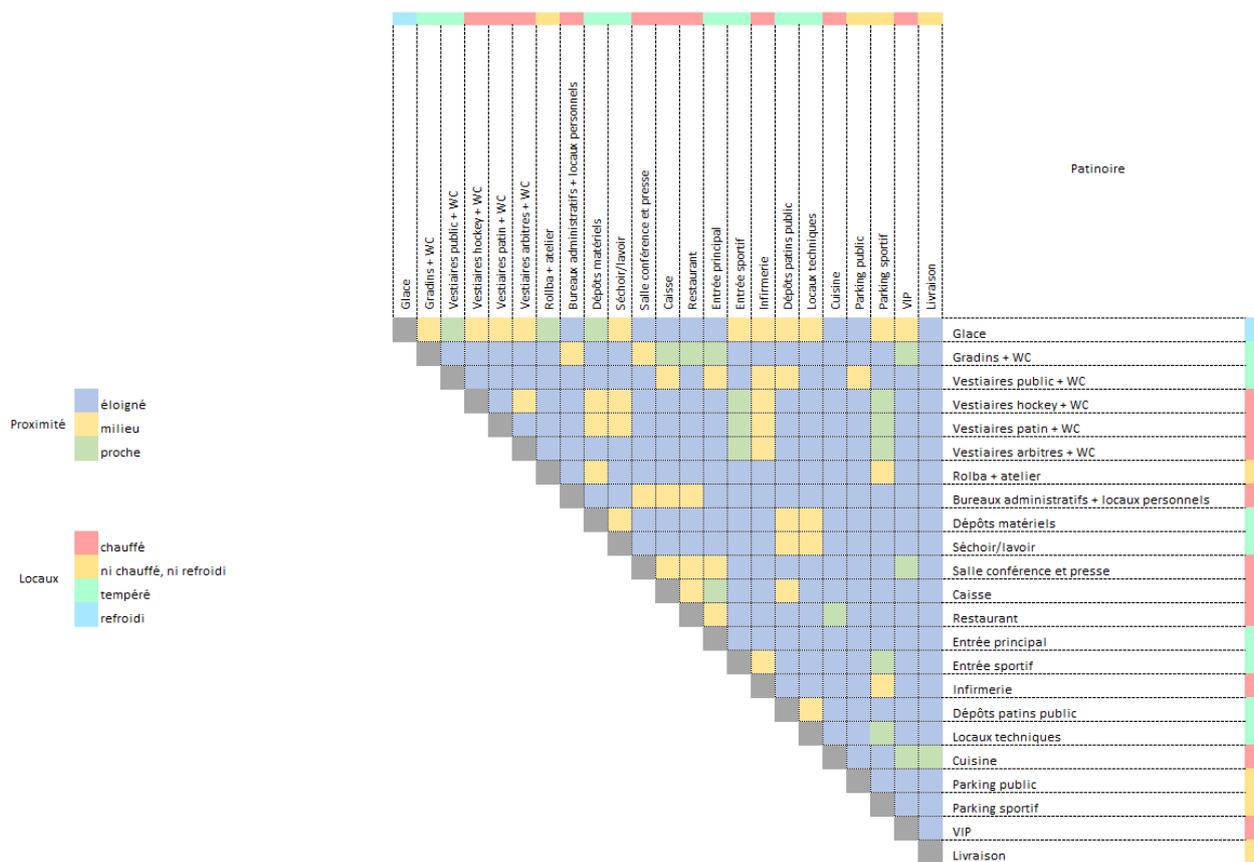


Figure 6: Matrice de proximité horizontale (version agrandie en annexe, page 61)



Figure 7: Matrice de proximité verticale (version agrandie en annexe, page 62)

Pour établir les matrices de proximité horizontale (Figure 6) et verticale (Figure 7), les aspects d'utilisation des locaux ainsi que les aspects thermiques ont été considérés. Au niveau de l'utilisation, si deux locaux ont une bonne raison de se trouver l'un à côté de l'autre, ils auront alors tendance à être recommandés « proche » et « même étage ».

Dans les cas où il s'avère pratique que deux locaux se trouvent à proximité, mais ne posent pas d'inconvénient pour l'utilisation de la patinoire s'ils ne sont pas adjacents, ces locaux auront alors tendance à être recommandé « milieu », indépendamment du même étage ou d'un autre étage. Par exemple, il peut être avantageux que les locaux techniques dédiés à la production de froid se trouvent relativement proche de la glace, afin de minimiser les longueurs de tuyaux, donc les pertes de charges et pertes thermiques, entre les machines frigorifiques et la glace. Cependant, leur proximité ou non n'aura aucune influence sur l'expérience des spectateurs, professionnels et visiteurs de la patinoire, raison pour laquelle ils ne sont pas recommandés « proche » mais « milieu ».

Finalement, les locaux n'ayant pas de fonction commune évidente et donc pas de raisons de se trouver proches l'un de l'autre, sont recommandés comme « éloignés » et « étage différents ». Cela ne signifie pas nécessairement qu'ils doivent se trouver loin l'un de l'autre ni forcément à deux étages différents, mais plutôt que leur emplacement relatif est secondaire et sera plutôt le résultat d'un agencement permettant aux locaux qui ont des raisons d'être proches l'un de l'autre de l'être effectivement.

Au niveau thermique, l'objectif est de minimiser les interfaces entre locaux n'ayant pas la même stratégie de chauffage et climatisation.

Puisque l'agencement de chaque patinoire est unique, mais que les types de locaux et leur utilisation sont similaires, un agencement d'une patinoire type est présenté ci-dessous (Figure 8).

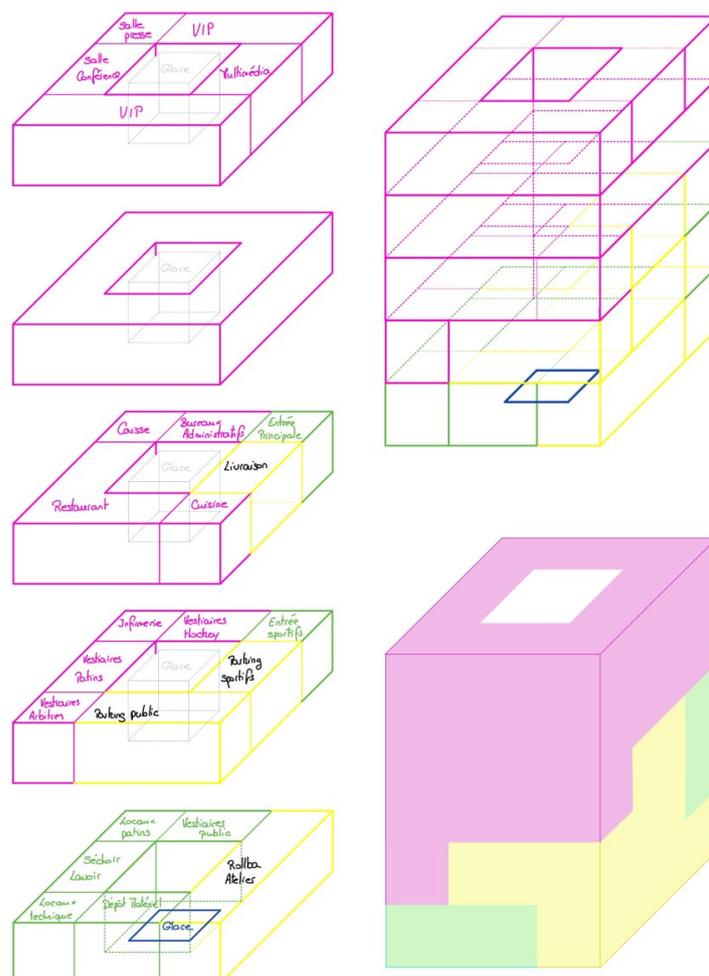


Figure 8: concept de mise en place des volumes à proximité et en étage

Cet agencement respecte les contraintes horizontales et verticales présentées dans l'analyse matricielle (Figure 6 et Figure 7). Les volumes sont agencés autour de la glace, et la glace se trouve au niveau 0 de la patinoire, à l'identique des quatre patinoires étudiées. La surface au sol des différentes pièces a été fixée de sorte à ce que les proportions soient crédibles et respectent l'ordre de grandeur observé pour les patinoires de Prilly, Viège, Porrentruy et Neuchâtel. Par ailleurs, les installations annexes, tels qu'une piscine comme dans le cas de la Vaudoise Arena, ne sont pas considérées dans cet agencement, puisqu'elles ne sont pas indispensables pour la fonction d'une patinoire. En l'absence de principes directeurs plus clairs dans l'agencement des patinoires existantes étudiées, ce modèle sert de base aux simulations énergétiques et pistes d'optimisations présentées aux chapitres 4 et 5.

## 2.1.6 Matériaux de construction

Le choix des matériaux de construction fait également partie des aspects pouvant être considéré dans le but de construire et exploiter une patinoire le plus durablement possible. Actuellement, les matériaux les plus utilisés sont le béton, le béton armé, l'acier et les isolants synthétiques (polyuréthane, polystyrène expansé, etc.). Cependant, des exemples, comme la Raiffeisen Arena à Porrentruy, montrent que l'utilisation de matériaux de construction biosourcés, du bois dans ce cas précis, pour une partie significative du bâtiment est envisageable. Un aperçu des matériaux de construction durables envisageables pour les différents éléments d'une patinoire est présenté sur la Figure 9.

	Toiture	Murs extérieurs	Murs intérieurs	Gradins	Dalle glace	Dalles	Radier	
Bois lamellé-collé	■							
Acier								
Béton armé (Référence)					■			
Terre projetée		■	■	■		■		
Béton armé avec CO <sub>2</sub>								
Isolation au chanvre		■	■	■		■		
Isolation polyuréthane								

Figure 9: Candidat de matériaux de construction à moindre impact écologique pour les différents éléments d'une patinoire

Les structures porteuses, dalles, gradins et certains toits sont habituellement réalisés en béton et béton armé. Principalement dû au processus de fabrication du ciment, le béton est un matériel de construction avec une empreinte carbone importante, de l'ordre de 200 kg CO<sub>2</sub>-eq/m<sup>3</sup> <sup>1</sup>. En raison de ses propriétés mécaniques, et de la possibilité de les augmenter en ajoutant une armature en acier au béton, il représente un matériel difficile à remplacer par une alternative plus durable. Le candidat le plus prometteur pour remplacer le béton classique est le béton de terre projetée (shot-earth en anglais).

Le béton de terre projetée est obtenu en mélangeant le sol de la zone de fouille avec de l'eau et, si nécessaire, un liant approprié au sol excavé <sup>2</sup>. Le mélange est ensuite propulsé sous forme de jet à haute vitesse, environ 300 km/h, contre un coffrage. A l'impact, le mélange se compacte directement, ce qui réduit le temps de temps de prise comparé à un élément en béton classique. Si les éléments sont construits sur place, cette technique réduit les besoins en coffrage qui seraient nécessaires pour couler un béton classique; en effet, le béton en terre projetée ne nécessite un coffrage que sur une face pour se compacter. Il est cependant nécessaire de disposer d'environ 1,2m d'espace afin d'avoir la place pour la tuyau et l'ouvrier projetant le mélange. Le béton de terre projetée peut également être stabilisé et armé pour améliorer ses propriétés mécaniques.

L'attrait principal de ce matériau est principalement le réemploi du sol excavé pendant les fouilles pour en faire un matériau de construction. Cela évite de devoir le transporter et le mettre en décharge et diminue aussi les besoins en matériaux fraîchement extrait comparé à un béton classique. Cependant, la mise en œuvre de béton de terre projetée pose aussi son lot de défis. Premièrement, il nécessite une étude approfondie avant le début des travaux afin d'analyser le sol et déterminer un mélange adéquat afin de créer un béton de terre projetée satisfaisant du point de vue de ces propriétés mécaniques, puisque les bétons de terre projetée s'apparentent plutôt à des bétons à faibles résistances <sup>3</sup>.

Quant à sa mise en œuvre pendant le chantier, afin de ne pas diminuer ses avantages du point de vue de la durabilité, le sol extrait pendant les fouilles devrait, si possible, être stocké à proximité du chantier, puisque de longs transports vers un lieu de stockage temporaire ont également un coût environnemental. Pour cela, il faudrait idéalement qu'il y ait un terrain à proximité permettant de stocker le sol provenant des fouilles et permettant si possible aussi la préfabrication d'éléments. Une autre solution pourrait aussi être

<sup>1</sup> BETONSORTENRECHNER KBOB : [HTTPS://WWW.KBOB.ADMIN.CH/KBOB/FR/HOME/THEMEN-LEISTUNGEN/NACH-HALTIGES-BAUEN/OE KOBILANZDATEN\\_BAUBEREICH.HTML](https://www.kbob.admin.ch/kbob/fr/home/themen-leistungen/nach-haltiges-bauen/oe kobilanzdaten_baubereich.html)

<sup>2</sup> MULTI-PHASE HOMOGENIZATION PROCEDURE FOR ESTIMATING THE MECHANICAL PROPERTIES OF SHOT-EARTH MATERIALS. M. BACCIOCCHI ET AL.

<sup>3</sup> SHOT-EARTH FOR SUSTAINABLE CONSTRUCTIONS, A. CURTO ET AL.

de stocker le sol des fouilles sur le lieu du chantier lui-même, avec les contraintes que cela impose du point de vue de l'organisation des travaux.

Le seul élément habituellement réalisé en béton pour lequel le béton de terre projetée n'est à priori pas utilisable est la dalle sur laquelle la couche de glace est formée. En raison de sa mise en oeuvre qui consiste à propulser un mélange à haute vitesse sur une face de coffrage, il est très difficile d'obtenir une surface parfaitement plane. Même s'il est possible de lisser la face d'un mur en béton de terre projetée, s'assurer qu'une dalle de 30m x 60m soit parfaitement plane n'est pas praticable. Par opposition, le béton classique, qui est liquide lorsqu'il est coulé, va avoir tendance à garantir une surface plane.

En résumé, mettre en oeuvre des éléments en béton de terre projetée est potentiellement intéressant dans l'optique d'augmenter la part de matériaux de construction durables. Pour un cas concret, il faut toutefois procéder à une étude approfondie des sols et des mélanges réalisables, adapter la manière de travailler sur le chantier pour accommoder les contraintes de sa mise en oeuvre ainsi que procéder à un écobilan du cas concret afin de s'assurer que l'objectif de durabilité est bel et bien atteint, en particulier, s'il est nécessaire et stabiliser ou armer un béton de terre projetée là où un béton classique à haute résistance aurait fait l'affaire, sans devoir être armé.

L'utilisation d'acier et de verre comme matériaux de construction n'est pas recommandée dans ce rapport, bien que seul l'acier soit potentiellement remplaçable par un matériau biosourcé, donc potentiellement plus durable. L'acier peut parfois être remplaçable par du bois, pour certains éléments de la structure porteuse et en particulier pour la toiture. La Raiffeisen Arena à Porrentruy montre que c'est possible, mais aussi que cela impose certaines limites. En effet, il s'agit d'une patinoire relativement petite comparée à la Vaudoise Arena à Prilly. Même si le bois du point de vue de la durabilité est très intéressant puisque biosourcé, il reste néanmoins moins polyvalent que l'acier en raison de propriétés mécaniques exceptionnelles de l'acier. Plus le bâtiment autour d'une patinoire est grand et haut, plus il devient difficile d'utiliser du bois dans sa structure porteuse, bien que l'utilisation en toiture, même celle en dessus de la glace avec sa grande portée, reste envisageable.

Quant au verre, la raison principale pour laquelle il n'est pas recommandé comme élément de construction de façade – le seul élément pour lequel il serait techniquement adapté – est lié à ses propriétés thermiques. En effet, la valeur U (transmission de la chaleur) d'un mur solide bien isolé est nettement inférieure à celle d'une façade principalement composée d'éléments en verre. En conséquence, sauf pour des cas particuliers, l'utilisation de verre en façade a tendance à augmenter les pertes thermiques des zones chauffées de la patinoire en hiver. De plus, si les éléments en verre laissent le rayonnement solaire pénétrer à l'intérieur de la patinoire et de chauffer des parois de l'enceinte contenant la glace, tel que l'arrière des gradins, alors cela pourrait engendrer une demande de froid supplémentaire pour maintenir la glace, particulièrement en été. Ces deux désavantages du verre font probablement partie des raisons pour lesquelles sur les quatre patinoires étudiées pour ce rapport, seule la Lonza Arena à Viège intègre des grandes baies vitrées dans son enveloppe. Quant à La Vaudoise Aréna, certaines séparations entre les couloirs (zone chaude) et la petite patinoire intérieure sont en baie vitrée.

Finalement, en ce qui concerne les isolants thermiques et phoniques utilisés pour les murs internes et externes, là aussi l'utilisation de matériaux biosourcés est la piste principale pour améliorer la durabilité d'une patinoire du point de vue de sa construction. La laine de chanvre est mise en avant, bien qu'il y ait beaucoup d'alternatives d'isolants biosourcés, tels que la laine de bois, les matelas en fibre de cellulose, etc. En effet, la laine de chanvre, en plus de ses propriétés thermiques similaires aux alternatives, possède des propriétés hygrométriques avantageuses. De plus, le chanvre peut être cultivé sur la plupart des terrains sans grandes complications. Cependant, les isolants biosourcés en général ont tendance à avoir des propriétés thermiques légèrement inférieures aux isolants synthétiques les plus performants, tels que le PUR ou PEX. Il n'est donc pas possible d'affirmer catégoriquement qu'un isolant biosourcé sera nécessairement plus durable qu'une alternative synthétique, puisqu'il faudra soit augmenter les épaisseurs d'isolations ou accepter des déperditions thermiques plus importantes, ce qui pourrait contrebalancer leur avantages au niveau de leur provenance. Comme l'impact de l'utilisation de béton de terre projetée comparé à un béton classique, il convient également de procéder à un écobilan et une analyse thermique détaillée d'un projet concret afin de déterminer quelle est la solution la plus durable.

## 2.2 Installations énergétiques et stratégie de régulation

Les installations énergétiques d'une patinoire représentent des consommations significatives avec de gros potentiels d'optimisation des installations et des interactions entre les différents systèmes. En exemple sur la Figure 10<sup>4</sup>, le cas des patinoires suédoises présenté dans un rapport de la Fédération internationale de hockey sur glace montre les quantités d'énergie achetées pour les différents systèmes de patinoires à basse et haute efficacité énergétique.

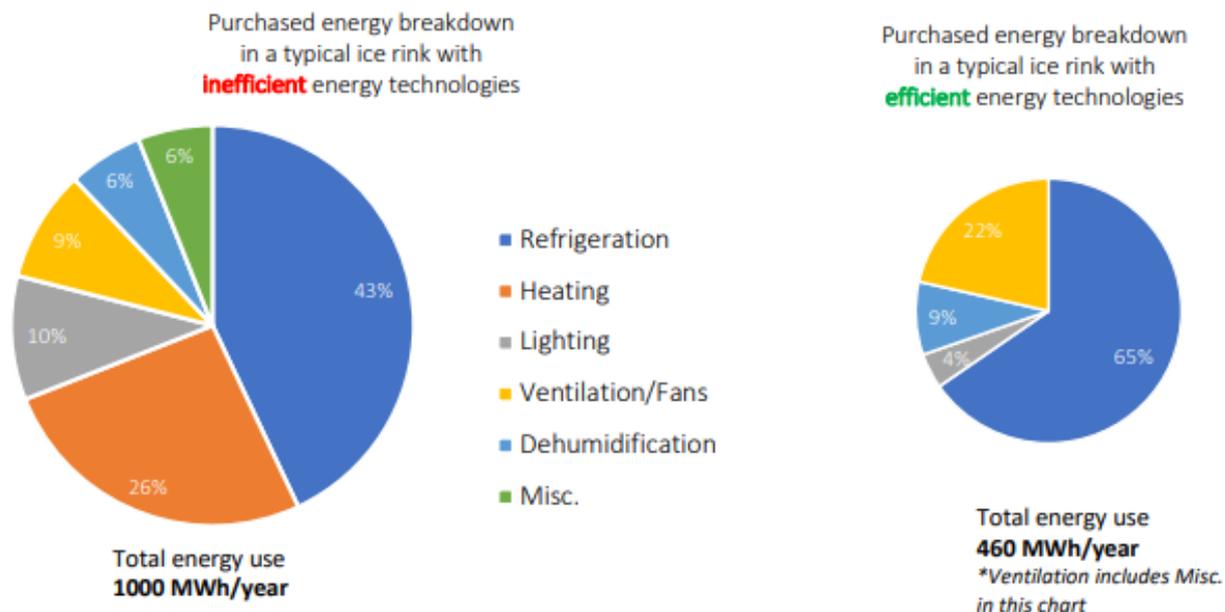


Figure 10: Principales consommations énergétiques des patinoires suédoises à basse et haute efficacité énergétique

Les principaux postes des consommations énergétiques sont les besoins en froid, afin de maintenir la glace, et en chaud, pour chauffer les locaux attenants et la production d'eau chaude sanitaire (ECS). Les trois autres systèmes principaux sont l'éclairage, la ventilation, la déshumidification.

Comme le montre la Figure 10, le potentiel de diminution des consommations énergétiques en optimisant les patinoires est très élevé, plus de la moitié de la consommation initiale – ce potentiel dépendant bien évidemment de la situation initiale. Au travers de ce chapitre, les cinq principaux systèmes énergétiques d'une patinoire et les pistes pour les optimiser sont mentionnés. Cela afin de poser les bases pour une évaluation du potentiel d'économie énergétique pour les patinoires suisses.

Dans le cadre de ce rapport, les hypothèses et les limites suivantes ont été choisies :

- Les patinoires considérées sont des installations ayant la capacité d'accueil des matchs de ligue suisse de hockey, avec ce que cela impose en place en nombre de spectateurs et en infrastructures annexes.
- Les infrastructures annexes aux patinoires n'apportant pas de plus-value pour la fonction principale de la patinoire, les piscines ou les centres commerciaux sont considérées comme externes aux installations de glace du point de vue des consommations énergétiques.
- Les infrastructures externes nécessaires pour une patinoire accueillant des matchs de hockey sur glace de niveau professionnel et semi-professionnel, tels que les restaurants, buvette, salles multi-média, etc. sont considérées comme partie intégrante de la patinoire du point de vue thermique (chauffage, ventilation, ECS), mais les consommations électriques de ces locaux (excepté l'éclairage) ne sont pas prises en compte.

<sup>4</sup> IIHF GUIDE TO SUSTAINABLE ICE ARENAS

- Les besoins énergétiques de la ventilation incluent les besoins thermiques afin de tempérer l'air depuis la température extérieure jusqu'à la température de la zone à ventiler. La ventilation est ainsi thermiquement neutre, ne contribuant pas au chauffage et/ou au refroidissement des zones, ces besoins sont comptabilisés séparément. Les besoins énergétiques pour la déshumidification également comptabilisés séparément.

### 2.2.1 Dalle de glace

La dalle de glace est l'élément central d'une patinoire, autour de laquelle tous les systèmes énergétiques sont sélectionnés et dimensionnés. Sa construction est déterminante pour le système de production de froid. Sur sa surface, une couche de glace doit être maintenue à  $-5 / -6^{\circ}\text{C}$  avec une épaisseur de 5cm (cas : Vaudoise Arena). Comme le montre la Figure 11<sup>5</sup>, la glace repose sur une couche de béton traversée par des tuyaux au travers desquels circulent un réfrigérant. Sous cette couche de béton se trouve une isolation thermique, afin que la puissance de froid serve au maximum à refroidir la couche de glace et un minimum le sol en dessous. Pour cette isolation thermique, le rapport de la Fédération internationale de hockey sur glace (IIHF)<sup>5</sup> recommande l'utilisation de polystyrène extrudé (XPS), en raison de sa résistance mécanique et de son imperméabilité à la vapeur. En dessous de la couche d'isolation se trouve à nouveau une couche de béton traversée de tuyaux, pour permettre de la réchauffer à  $3^{\circ}\text{C}$  et ainsi maintenir le sol hors gel afin d'éviter des dégâts à la structure. Dans certains cas, si le sol ou ce qui se trouve en dessous de la dalle de glace ne risque pas de geler, ces tuyaux de chauffage ne sont pas nécessairement présents.

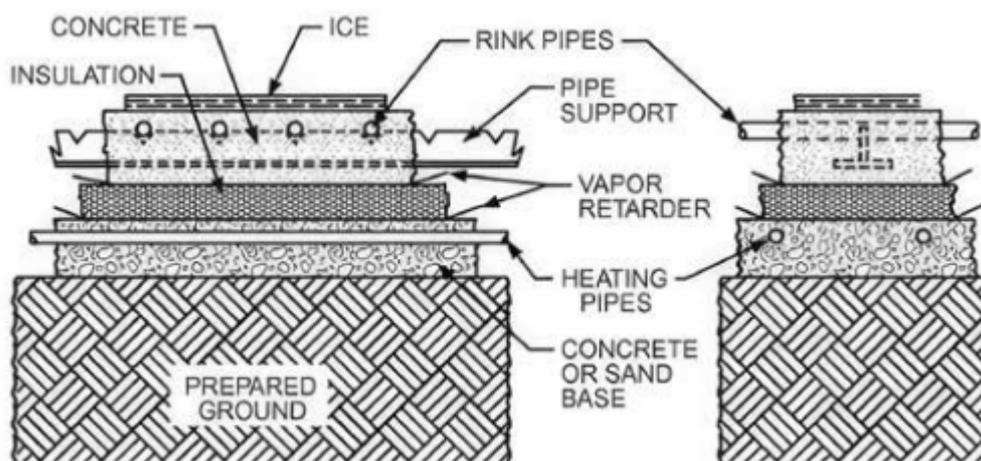


Figure 11: Construction d'une dalle de glace typique

Les tuyaux dans la couche de béton supérieur où circule le réfrigérant sont typiquement en PVC, acier inox, acier noir ou cuivre. Au niveau de la conductivité thermique, le cuivre est le plus avantageux, suivi des aciers inox et noirs puis finalement le PVT. En effet, une conductivité thermique plus grande du tuyau permet de maximiser le transfert de chaleur du réfrigérant à la glace et diminue ainsi les besoins de froid pour maintenir la glace. Cependant, le coût des tuyaux ainsi que leur compatibilité avec les différents réfrigérants (corrosion, pression) sont également importants. Ces aspects sont discutés plus en détail au chapitre 2.2.2 Production de froid.

<sup>5</sup> IIHF GUIDE TO SUSTAINABLE ICE ARENAS

Afin de minimiser les « pertes de froid », c'est-à-dire la chaleur absorbée du sol et non de la dalle de glace par le système frigorifique, une possibilité d'optimisation pourrait être d'intégration d'un vide sanitaire sous la dalle de glace, comme présenté sur la Figure 4Figure 12.

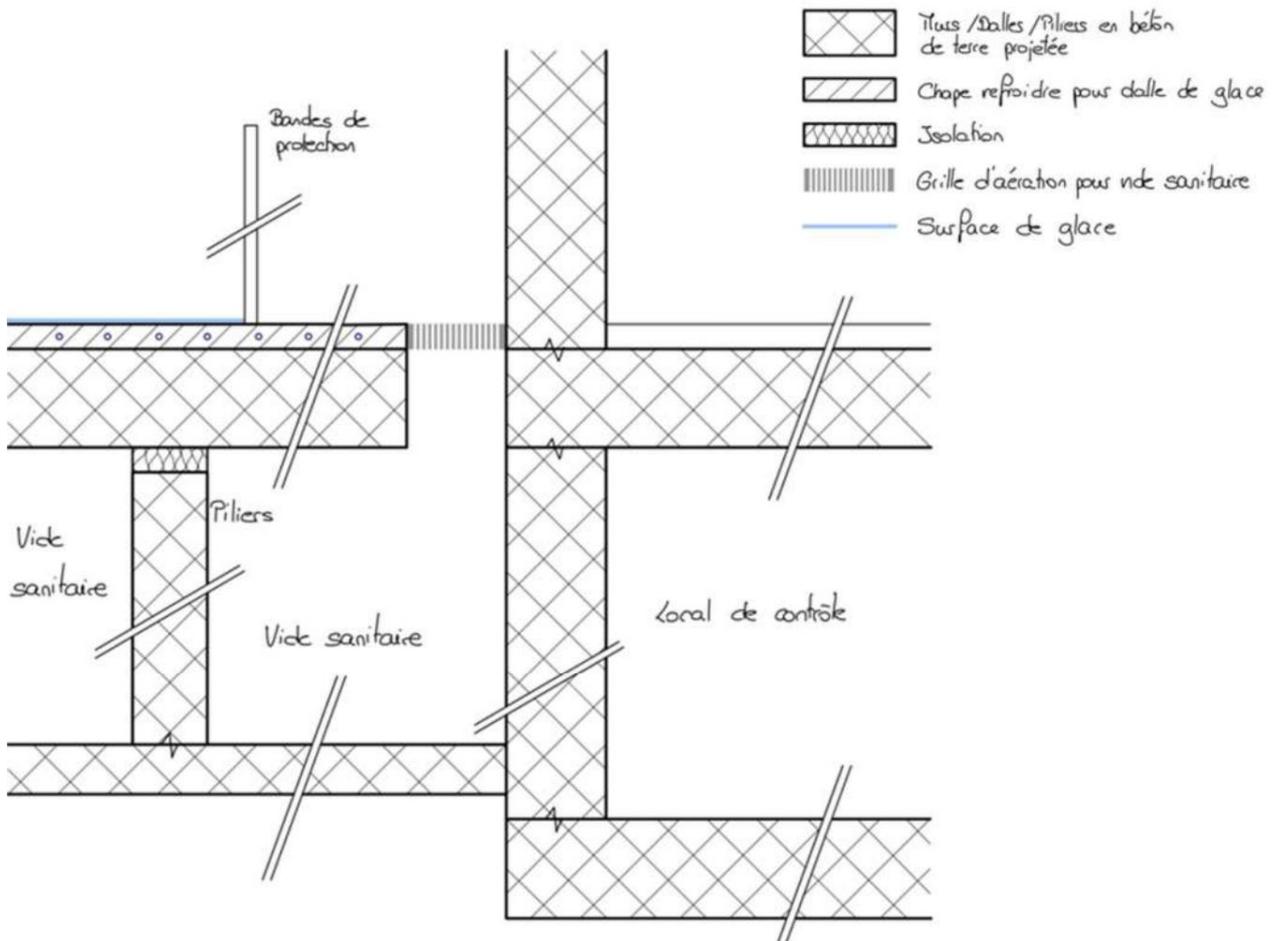


Figure 12: Concept de vide sanitaire sous la dalle de glace

Le vide sanitaire sous la dalle de glace pourrait être une alternative aux systèmes de chauffage pour maintenir le sol hors-gel. De plus, cette configuration minimise également les contacts entre la structure du bâtiment de la patinoire et la dalle de glace, limitant ainsi les potentiels ponts thermiques. Les calculs d'échange thermique entre le sol et la dalle de glace, comparé à la construction traditionnelles sont présentés au chapitre 4.1.2.

## 2.2.2 Production de froid

Le principal consommateur d'énergie dans une patinoire est son système frigorifique. Son objectif est de produire et de maintenir la glace entre -2 et -6 °C. En ce qui concerne son principe de fonctionnement, le refroidissement de la dalle de glace peut se faire de manière directe ou indirecte, comme illustré sur la Figure 13 <sup>6</sup>.

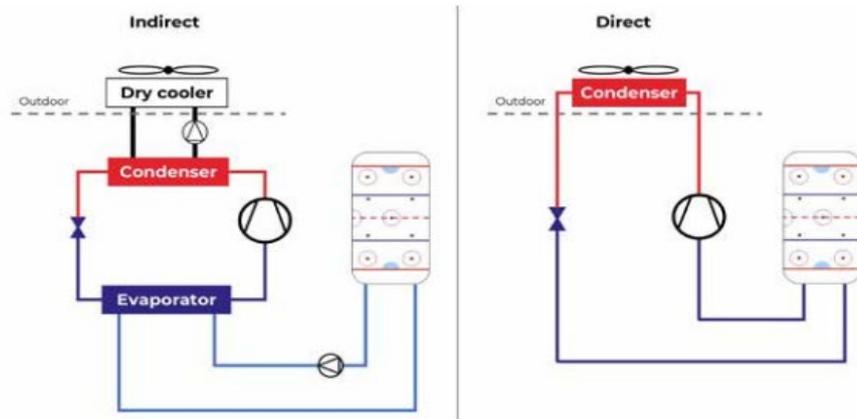


Figure 13: Configuration de systèmes frigorifique indirecte (à gauche) et directe (à droite)

Les systèmes directs offrent les avantages principaux suivants : Premièrement, l'absence d'échangeur de chaleur entre le fluide de travail du cycle frigorifique et le serpentin sous la dalle de glace permet au cycle de travailler avec une température d'évaporation supérieure comparée à un système indirect. Il en va de même pour les rejets de chaleur pouvant être libérés dans l'environnement à un plus bas niveau de température, également en raison de l'absence d'échangeur de chaleur intermédiaire. Cette considération sur les rejets de chaleur est toutefois à relativiser. En effet, la position du local technique dans le bâtiment pourrait rendre une solution directe impraticable. De plus, une telle solution pourrait également ne pas être compatible avec une réutilisation des rejets de chaleur à d'autres fins, comme assurer des besoins de chauffage. Le deuxième avantage d'un système direct est une température de glace plus uniforme <sup>6</sup>, puisque l'évaporation du fluide de travail permet d'absorber la chaleur de manière isotherme. Le fluide entrant et sortant du serpentin est ainsi à la même température. Finalement, une configuration directe permet également d'économiser la puissance de pompage nécessaire à un système indirect.

L'inconvénient principal des systèmes directs est lié à certaines propriétés problématiques des fluides de travail utilisés pour des cycles frigorifiques, comme par exemple la toxicité de l'ammoniac (NH<sub>3</sub> / R717) ou encore le potentiel de réchauffement climatique très élevé de la majorité des fluides synthétiques, comme présenté dans le Tableau 1. De plus, certains réfrigérants limitent également le choix de matériaux utilisables pour les tuyaux de serpentins en raison de leurs propriétés corrosives et/ou du niveau de pression nécessaire.

Tableau 1: Candidats de réfrigérants identifiés par la IIFH <sup>6</sup>

Réfrigérant	Type	Toxicité	Inflammabilité	GWP
R744 (CO <sub>2</sub> )	Naturel	Non	Non	1
R717 (NH <sub>3</sub> )	Naturel	Oui	Faible	0
R290 (C <sub>3</sub> H <sub>8</sub> )	Naturel	Non	Forte	3
R404A	Synthétique (HFC)	Non	Non	3922
R123a	Synthétique (HCFC)	Non	Non	1430
R513A	Synthétique (HFO)	Non	Non	661
R1234yf	Synthétique (HFO)	Non	Faible	4

<sup>6</sup> IIFH GUIDE TO SUSTAINABLE ICE ARENAS

Que le système de refroidissement soit direct ou indirect, le choix du réfrigérant détermine non seulement les performances des machines frigorifiques mais aussi un certain nombre de contraintes. En raison de leur potentiel de réchauffement climatique et de leur effet nocif pour la couche d'ozone, les réfrigérants synthétiques de type HFC et HCFC sont soit interdits, soit risquent de l'être dans un futur relativement proche. Pour cette raison, choisir un de ces fluides lors de la construction d'une nouvelle patinoire ou d'une rénovation n'est pas un choix judicieux. Un réfrigérant de type HFO, comme le R1234yf, n'a qu'un faible potentiel de réchauffement climatique et n'endommage pas la couche d'ozone. Toutefois leur décomposition dans l'atmosphère génère des TFA (acide trifluoroacétique), pouvant créer localement une accumulation en raison de leur longue durée de vie et créer des problèmes environnementaux<sup>7</sup>. De plus, étant donné que les HFO sont relativement récents, il existe un risque que certains de leurs effets secondaires ne soient découverts que trop tard, comme cela a été le cas avec le trou dans la couche d'ozone et les HFC / HCFC. Pour ces raisons, l'utilisation de réfrigérants naturels dans les machines frigorifiques de patinoires à faible impact environnemental et climatique est un le choix cohérent. Pour des applications frigorifiques, l'ammoniac (R717) est un choix classique, bien que le CO<sub>2</sub> (R744) ait aussi certains avantages. Les performances de ces deux réfrigérants ainsi que celle du R404a sont comparées au chapitre 4.2.1.

Pour les systèmes frigorifiques indirects, la Fédération internationale de hockey (IIFH) identifie les réfrigérants suivant pouvant être utilisés dans le circuit secondaire <sup>8</sup>:

Le plus couramment utilisés :

- Ethylène glycol (EG)
- Chlorure de calcium (CaCl<sub>2</sub>)
- Eau ammoniacquée (NH<sub>4</sub>OH)
- Dioxyde de carbone (CO<sub>2</sub>)
- Formate de potassium (KF)

Et moins fréquemment utilisés :

- Propylène glycol (PG)
- Ethanol (EA)
- Acétate de potassium (KAc)

Tous ces fluides ont leurs avantages et désavantages. Du point de vue de leur fonction principale, transporter la chaleur de la dalle de glace vers l'évaporateur du système frigorifique, le fluide idéal doit combiner une faible viscosité pour limiter la puissance de pompage, une bonne conductivité thermique pour pouvoir efficacement transférer de la chaleur ainsi qu'une haute chaleur spécifique et densité, afin de diminuer le débit requis et ainsi la puissance de pompage. <sup>8</sup>

---

<sup>7</sup> STUDY ON ENVIRONMENTAL AND HEALTH EFFECTS OF HFO REFRIGERANTS, REPORT PREPARED FOR THE NORWEGIAN ENVIRONMENT AGENCY. DAVID FLEET ET AL.

<sup>8</sup> IIFH GUIDE TO SUSTAINABLE ICE ARENAS

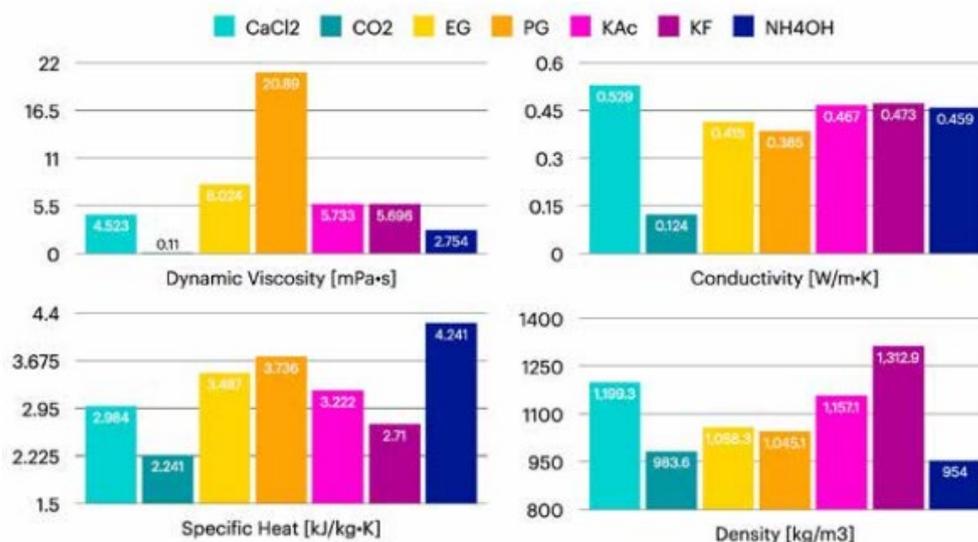


Figure 14: Propriétés thermo-physiques des réfrigérants pour circuits secondaires <sup>9</sup>

Comme le montre la Figure 14, l'eau ammoniacuée est le réfrigérant correspondant le mieux aux critères mentionnés. En effet, sa viscosité est la deuxième valeur la plus basse, environ la moitié des alternatives, excepté le CO<sub>2</sub>, et le produit de sa chaleur spécifique et de sa densité est meilleure ou égale aux alternatives. De plus, il ne pose pas de problème particulier de corrosion pour les tuyaux. Son seul désavantage est sa toxicité, bien que peu dangereuse en raison de la faible concentration d'ammoniac requise pour atteindre une température de congélation de -20°C.

Un autre réfrigérant intéressant pour les circuits secondaires est le CO<sub>2</sub>. En raison de son changement de phase dans l'évaporateur de la dalle de glace, sa capacité thermique est nettement supérieure à ce que montre la Figure 14, puisque la chaleur latente n'y est pas prise en compte. De plus, dû à une viscosité très basse, le CO<sub>2</sub> permet de réduire très nettement la puissance de pompage nécessaire, selon le guide de l'IIHF <sup>10</sup> à 1 kW là où les alternatives nécessitent 10 – 15 kW. Le désavantage principal du CO<sub>2</sub> est le niveau de pression nécessaire, environ 20 bars, et le risque de fuite difficilement réparable dans la tuyauterie de la dalle de glace. En raison de la complexité des calculs ainsi que le manque d'informations, les débits nécessaires et puissances exactes de pompes pour des circuits secondaires utilisant du CO<sub>2</sub> ne sont pas évalués dans ce rapport.

### 2.2.3 Chauffage et ECS

Le chauffage et la production d'eau chaude sanitaire représentent le deuxième poste de consommation d'une patinoire (Figure 10). En raison de l'utilisation de machines frigorifiques pour maintenir la dalle de glace, l'utilisation des rejets de chaleur de ces machines pour couvrir les besoins en chauffage et ECS de manière directe ou indirecte est certainement une des pistes les plus intéressantes afin d'optimiser l'efficacité énergétique des patinoires.

Pour les consommations d'eau chaude sanitaire, la chaleur fournie doit permettre de réchauffer l'eau froide du réseau jusqu'à une température de 60°C, le producteur de cette chaleur doit donc être capable d'atteindre 65°C. Dans le cadre de cette étude, la température d'arrivée de l'eau froide sanitaire est supposée de 10°C toute l'année, pour toutes les régions climatiques étudiées. Les besoins en eau chaude sanitaire se chiffrent à environ 10'000 L/jour pour les restaurants, buvettes et wc en supposant 650 couverts par jour à 15 L/jour selon SIA 2024 <sup>11</sup>. A cette consommation s'ajoutent des besoins de 6'000 litres par jour pour les douches et vestiaires, en supposant une dizaine de douches par heures pendant les quinze heures d'ouvertures quotidiennes d'une patinoire. Finalement, l'entretien de la glace nécessite 4'000 L/jour, soit

<sup>9</sup> KILBERG, B. 2020. AQUA AMMONIA AS SECONDARY FLUID IN ICE RINK APPLICATIONS. STOCKHOLM, KTH

10 IIHF GUIDE TO SUSTAINABLE ICE ARENAS

11 SIA 2024 DONNÉES D'UTILISATION DES LOCAUX POUR L'ÉNERGIE ET LES INSTALLATIONS DU BÂTIMENT

une valeur moyenne pour 5 à 10 surfaçages par jour nécessitant chacun entre 400-800 litres d'eau à 60°C, afin de faire fondre la glace abîmée et ainsi obtenir à nouveau une surface plane lorsque la couche fondue se solidifie.

En supposant une efficacité de stockage et de distribution de 90%, les besoins quotidiens en ECS d'une patinoire et de ces annexes est de l'ordre de 22'000 L/jour d'ECS à 60°C. Cela représente une puissance moyenne de 53.2 kW et une consommation annuelle de chaleur de 428 MWh. Les possibilités pour couvrir ce besoin de manière directe et indirecte en utilisant les rejets de chaleur des machines frigorifiques sont discutées au chapitre 4.2.2, pour chacune des options de machines frigorifiques (R404a, R717, R744).

Une simulation dynamique d'une patinoire type réalisée avec le logiciel IDA-ICE, présentée au chapitre 4, permet de chiffrer les besoins en chauffage pour quatre zones climatiques (Figure 24), allant de 166 MWh/an jusqu'à 439 MWh/an, avec une puissance moyenne de l'ordre de 45 kW à 120 kW pour les mois de novembre jusqu'à janvier. Il est supposé que ces besoins peuvent être couverts en fournissant de la chaleur à 32°C, par chauffage au sol et/ou ventilation, nécessitant ainsi une source de chaleur correspondante à 33.5°C, en tenant compte d'une différence de température de 1.5 K entre la source et le besoin de chaleur.

#### 2.2.4 Ventilation et déshumidification

Les débits d'air nécessaires à la ventilation des différents locaux ont été évalué en fonction du nombre de personnes pouvant être présentes dans les locaux ou de leur surface, selon les normes SIA 385/5<sup>12</sup> et SIA 2024<sup>13</sup>. Les évaluations détaillées sont présentées dans le Tableau 13 en annexe.

Plusieurs profils d'utilisations ont été définis :

- Pour les zones ayant un profil **général**, la ventilation est considérée constante au débit nominal pendant les heures d'ouvertures de la patinoire, soit de 7h00 à 22h00.
- Pour les zones avec un profil **allégé**, la ventilation est considérée en fonctionnement depuis une heure avant le début de l'utilisation d'une zone jusqu'à une heure après. Cela concerne les zones ayant des liens avec les matchs et/ou des utilisations par des groupes d'utilisateurs précis, comme les vestiaires publiques et pour clubs de patinage et hockey.
- Pour les zones avec un profil de **match**, la ventilation est considérée active uniquement les samedis de 18h00 à 22h00, soit depuis une heure avant le match jusqu'à une heure après.
- Pour la patinoire elle-même, le profil de ventilation est un **mixte** du profil **général** et du profil **match**. La ventilation fonctionne à puissance maximale pendant le match et à 20% le reste du temps

---

12 SIA 385/5 INSTALLATIONS D'EAU CHAUDE SANITAIRE DANS LES BÂTIMENTS - BESOINS EN EAU CHAUDE, EXIGENCES GLOBALES ET DIMENSIONNEMENT

13 SIA 2024 DONNÉES D'UTILISATION DES LOCAUX POUR L'ÉNERGIE ET INSTALLATIONS DU BÂTIMENT

La synthèse des débits de ventilation nécessaire dérivant du Tableau 13 en annexe est présentée ci-dessous dans le Tableau 2.

Tableau 2: Synthèses des débits de ventilations par zone en général et pendant les matchs

Zone	Débit général [m <sup>3</sup> /h]	Débit match [m <sup>3</sup> /h]
Tempérée	6300	9200
Chauffée	31000	47000
Refroidie	160000	32000

Comme le montre le Tableau 2, les débits nécessaires dans la patinoire (glace), la seule zone refroidie, représentent l'un des principaux besoins en ventilation. En particulier, le débit d'air entrant dans la patinoire doit être tempéré de sorte à maintenir l'ambiance de cette zone à 15°C toute l'année. De plus, l'hygrométrie de l'air entrant doit être maintenue à 5 g<sub>eau</sub> par m<sup>3</sup>/air, afin d'éviter la formation de brouillard au niveau de la glace. Pour cela, l'air doit être refroidi jusqu'à 4°C / 100% d'humidité relative, puis réchauffé à 15°C. Le débit de 160'000 m<sup>3</sup>/h pendant les matchs correspond à 20 m<sup>3</sup>/h par personne et permet d'évacuer entre 500 et 600 kg d'eau par heure, en supposant que l'air extrait à une humidité absolue de 8 g<sub>eau</sub> par m<sup>3</sup>/air, soit 63% d'humidité relative. Pendant les matchs, 8'000 spectateurs produisant chacun environ 70 g<sub>eau</sub> (activité sédentaire selon SIA 180<sup>14</sup>) par heure représentent 560 g<sub>eau</sub> par heure à évacuer, d'où le débit nominal de ventilation pendant les matchs. Le débit hors période de forte affluence de 20% du débit nominal est une estimation à la suite d'un entretien avec les exploitants de la Vaudoise Arena à Prilly.

En raison du traitement de l'humidité pour ce débit d'air, un besoin de chaleur ainsi que de froid est nécessaire tout au long de l'année pour déshumidifier l'air de la patinoire. Le Tableau 3 **Erreur ! Référence non valide pour un signet.** présente les puissances des batteries froides et chaudes nécessaires afin de déshumidifier l'air extérieur et le tempérer à 15°C. La batterie chaude peut potentiellement être alimentée par des rejets de chaleur des machines frigorifiques, comme discuté au chapitre 4.2.2.

Tableau 3: Puissance des batteries froides et chaudes de la CTA pendant et hors match

Température extérieure	Batterie chaude [kW]	Batterie froide [kW]
-5	111 / 56	0 / 0
5	61 / 31	6 / 3
15	62 / 12	62 / 12
25	0 / 0	116 / 58

Le débit d'air nécessaire à la ventilation des zones chauffées et tempérées ne varie pas beaucoup pendant les périodes de match et l'utilisation générale de la patinoire. Les principaux besoins sont les restaurants et buvettes. Les besoins électriques annuels pour la ventilation, calculés sur la base de la CTA POOL AHU RECOVERY PLUS 30 de SAMPS S.p.A<sup>15</sup>, sont de 239 MWh/an.

## 2.2.5 Éclairage

L'éclairage de la totalité des locaux représente une part non négligeable de la consommation énergétique d'une patinoire avec 10% de la consommation totale.

Pour limiter la consommation électrique de l'éclairage, il convient bien évidemment d'utiliser les luminaires LEDs qui permettent de réduire considérablement la consommation d'électricité comparés aux anciennes

<sup>14</sup> SIA 180 PROTECTION THERMIQUE, PROTECTION CONTRE L'HUMIDITÉ ET CLIMAT INTÉRIEUR DANS LES BÂTIMENTS

<sup>15</sup> [HTTPS://EUROPAIRSCHWEIZ.CH/WP-CONTENT/UPLOADS/2019/01/SAMP-AHU.PDF](https://europa.schweiz.ch/wp-content/uploads/2019/01/SAMP-AHU.PDF)

alternatives. Dans le cadre de ce rapport, l'utilisation de lampe LED est considérée comme acquise. Ainsi, trois mesures d'optimisation d'un éclairage LED sont discutées au chapitre 4.2.4.

D'une situation où toutes les pièces sont éclairées à pleine puissance pendant les heures d'ouverture de 7h00 à 22h00 à une situation incluant des LED avec une meilleure efficacité, un éclairage différencié entre la glace et les gradins de la patinoire ainsi qu'un éclairage uniquement allumé lorsque les zones sont utilisées, il est possible de réduire la consommation électrique de 70%, soit de 268 MWh/an à 86 MWh/an.

### 2.2.6 Puits de fonte de glace

Afin de diminuer la consommation d'eau pour la maintenance de la glace, une solution est le recyclage de la glace abrasée lors du surfaçage. Typiquement, la glace abrasée est déversée dans un bassin chauffé afin de la faire fondre et pouvoir la réutiliser pour les surfaçages suivants. Un exemple d'un tel système est montré sur la Figure 15 <sup>6</sup>. Étant donné une consommation typique de 6'000 litres d'eau par jour pour l'entretien de la glace, un tel système permet d'économiser jusqu'à 1400 m<sup>3</sup> d'eau annuellement, moins les pertes et le renouvellement nécessaire.



Figure 15: Puits de fonte de glace (source : IIFH)

## 2.3 Synergies

En plus des possibilités d'optimiser les installations énergétiques d'une patinoire, par exemple en utilisant les rejets de chaleur des machines frigorifiques pour le chauffage et la production d'ECS, il est également possible d'intégrer les patinoires dans ces structures plus larges, tels que des centres sportifs contenant par exemple une piscine. Pour cette estimation du potentiel de l'optimisation énergétique d'une patinoire type, ces synergies à plus larges échelles sortent du cadre des considérations, bien qu'elles soient toutefois mentionnées. C'est la raison pour laquelle les différentes options d'optimisations présentées dans ce chapitre 3, puis calculées/simulées dans les chapitres 4 et 5 présentées du point de vue de la consommation énergétique de la patinoire elle-même. Il est possible, même probable, que certains choix ne soient pas optimaux d'un point de vue d'un complexe plus large. Cependant, pour une première analyse, les combinaisons possibles sont trop vastes pour être explorées en détail.

## 2.4 Monitoring

Cette étude, qui initialement était censée se baser principalement sur des données de monitoring de patinoires existantes, s'est transformée en une analyse d'une patinoire type, calculée et simulée. La raison principale pour ce choix se justifie par un manque de données des patinoires existantes. En effet, les relevés des consommations électriques et thermiques, pour autant qu'ils existent, se trouvent trop souvent au niveau de la patinoire entière, si ce n'est du complexe sportif intégrant des piscines et autres installations. Afin de pouvoir correctement suivre et optimiser l'exploitation des patinoires existantes, l'investissement dans des systèmes de monitoring adéquats permettrait probablement d'identifier plus facilement des potentiels d'économie et de mieux suivre et quantifier l'impact des mesures d'optimisations.

## 3 Modélisation d'une patinoire type

L'objectif de la modélisation de la patinoire type sur IDA ICE concerne les besoins de chauffage et de refroidissement du bâtiment ainsi que les besoins électriques en fonction de la stratégie générale d'une patinoire standardisée. La simulation thermique dynamique permettra une analyse plus spécifique des périodes critiques du bâtiment.

### 3.1 Paramètres de la simulation

#### 3.1.1 Emplacement et climat de référence

L'étude n'étant pas faite sur un bâtiment déjà construit, aucune coordonnée géographique n'est donc attribuée au bâtiment. Par conséquent, l'emplacement a été défini sur le plateau Suisse avec la station climatique de Bern-Lieberfeld<sup>16</sup>, à une altitude de 600m. Différents climats seront simulés pour voir si les climats plus rudes ou plus favorables que celui du plateau Suisse impactent de façon notable la simulation.

N'ayant pas de coordonnées géographiques particulières, aucun ombrage proche ou lointain ne sera considéré. Ceci n'impacte en aucun cas la simulation car le bâtiment est considéré sans aucune fenêtre.

#### 3.1.2 Géométrie

La géométrie du bâtiment est issue des différents plans d'étages donnés en annexe. Les différents étages ont été implémentés séparément avec une hauteur entre étage de 4m. Une orientation par défaut a été définie avec l'atelier rolba situé au nord. Lorsque les différents étages ont été implémentés, des fusions de zones ont été réalisées pour permettre de créer le grand espace de la patinoire.

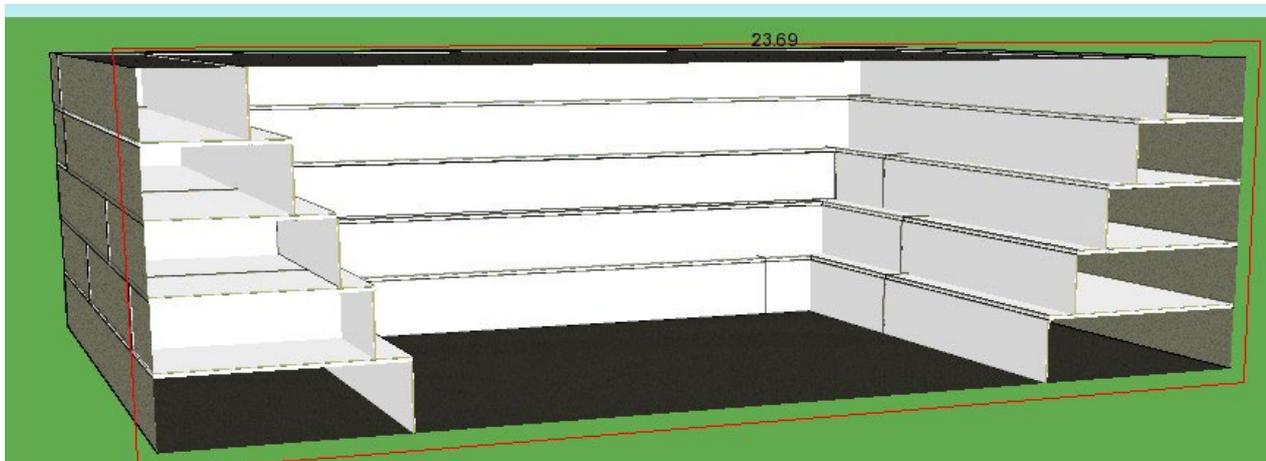


Figure 16: Vue d'une coupe axiale de la géométrie du bâtiment

La Figure 16 offre un visuel 3D de la géométrie intérieure avec une coupe axiale du bâtiment. La modélisation des gradins avec cette structure en escalier représente de façon réaliste les grandes patinoires avec les allées traversantes. Un toit plat recouvre l'ensemble de l'infrastructure. La surface au sol de la patinoire comprenant la glace et son pourtour est de 2823 m<sup>2</sup> tandis que la surface au plafond est de 4861 m<sup>2</sup>.

<sup>16</sup> SIA 2028 : norme sur les données climatiques pour la physique du bâtiment, l'énergie et les installations du bâtiment datant de 2010

### 3.1.3 Composition de la structure

La composition structurelle de la patinoire a été définie à partir de l'analyse faite des patinoires dans le chapitre précédent. Le détail des compositions des surfaces ainsi que les caractéristiques physiques de chaque matériau est donné en annexe.

Tableau 4 : Récapitulatif des valeurs U génériques pour les éléments de construction du bâtiment

Elément de l'enveloppe	Valeur U ((W/m <sup>2</sup> *K)
<b>Mur extérieur</b>	0,134
<b>Mur intérieur</b>	0,146
<b>Plancher intérieur</b>	0,147
<b>Plancher extérieur</b>	0,147
<b>Toiture</b>	0,116
<b>Mur de la patinoire</b>	0,148

### 3.1.4 Occupation de la patinoire

A partir de la discussion sur le fonctionnement des différentes patinoires en Suisse , un profil d'occupation général a été défini.

Heure	Activité réalisée
7h00	Hockey
8h00	Patinage artistique
9h00	Patinage artistique
10h00	Hockey
11h00	Hockey
12h00	Hockey
13h00	Libre
14h00	Libre
15h00	Libre
16h00	Libre
17h00	Patinage artistique
18h00	Patinage artistique
19h00	Hockey
20h00	Hockey
21h00	Hockey

Figure 17: Planning d'occupation général hors match

La Figure 17 donne le planning détaillé des heures d'occupations et des activités liées. Il s'avère que la patinoire est ouverte 14 h par jour de 7h à 21h. Chaque samedi, la patinoire accueille un match de 18h à 22h. Durant ce match, la tribune accueille 9'000 personnes.

Le bâtiment ferme ses portes durant le mois de juillet. Durant cette période de l'année, la patinoire et toutes les autres zones ne sont plus utilisées.

### 3.1.5 Eclairage

Les gains internes liés à l'éclairage ont été définis en fonction de la valeur ciblée selon la norme SIA 387/4<sup>17</sup>. Cette valeur cible est différente selon les affectations. Par ailleurs, la norme applique un facteur correctif de simultanéité sur certaines affectations.

Le rendement lumineux de l'éclairage a été défini à 100 lm/w et la part convective est de 30%.

Concernant la surface de calcul prise en compte pour l'enceinte de la patinoire, les gradins sont considérés comme éclairés ce qui implique de prendre la surface au plafond comme valeur de dimensionnement de la puissance électrique.

L'ensemble de l'éclairage est allumé pendant les heures d'ouvertures de la patinoire excepté pour les zones VIP, multimédia et conférence où un profil d'éclairage a été assigné uniquement pendant les heures de match (18h-22h uniquement le samedi).

### 3.1.6 Occupants

De manière similaire à l'éclairage, des gains internes liés aux occupants ont été introduits dans le modèle. La norme SIA 380/1<sup>18</sup> définit selon la catégorie d'ouvrage un nombre de personnes par m<sup>2</sup> et une puissance dégagée en chaleur pour une personne.

Pour simplifier le modèle, une puissance de chaleur unique a été définie à 95.6 W/pers issue de la moyenne pondérée en fonction des surfaces de chaque zone et de la valeur tabulée dans la norme. Le nombre de personnes dans le bâtiment hors heures de match est défini comme constant avec 482 personnes. Ces personnes sont réparties de manière équitable dans les différentes zones à hauteur de 50 m<sup>2</sup> par personne avec des facteurs correctifs selon les zones. De manière similaire à l'éclairage, les zones VIP, multimédias et conférence ne présentent aucun occupant en dehors de la période de match.

Lors des phases de matchs, 9337 personnes sont présentes dans le bâtiment avec une modification du nombre d'occupant uniquement dans les zones buvettes, dans l'enceinte de la patinoire et les zones VIP, multimédias et conférence.

### 3.1.7 Ventilation et débit d'air thermiquement actif

Afin de prendre en compte une efficacité typique de 90% pour la récupération de chaleur d'une CTA double flux, les débits d'air nominaux présentés dans le Tableau 2, un débit d'air thermiquement actif a été défini. Il s'agit de la quantité d'air à chauffer et/ou refroidir depuis la température extérieure jusqu'à la température des locaux. En combinant l'efficacité de la CTA et les pertes d'air par la ventilation naturelle inévitables (portes d'entrées, fenêtres ouvertes, fuites), la valeur du débit d'air actif a été fixée à 20% du débit d'air nominal.

### 3.1.8 Modélisation de la dalle de glace

La version 5.0 du logiciel ne permet pas encore de profiter de l'extension Ice Rinks and Pools. De ce fait, la dalle de glace n'est pas modélisée et la puissance de froid pour maintenir la dalle de glace à la température de -5°C ne sera pas prise en compte. Les calculs sur ce sujet seront faits à part de la simulation.

Ainsi les résultats de la simulation permettent de donner une puissance de chauffage ou de refroidissement pour maintenir l'enceinte de la patinoire à la température souhaitée, dans notre cas à 15 °C.

---

<sup>17</sup> Norme SIA 387/4 : base de calcul et exigence pour les consommations électriques liées à l'éclairage

<sup>18</sup> Norme SIA 380/1 : 2009, L'énergie thermique dans le bâtiment

## 3.2 Résultats de la patinoire type

### 3.2.1 Résultats génériques

Une stratégie de régulation a été mise en place avec des valeurs de température minimale et maximale en fonction du type de zone. Au final 4 stratégies de régulation doivent être respectées.

Tableau 5: Récapitulatif des températures limites dans les zones pour vérification de la stratégie de régulation hors mois de juillet

Stratégie de la zone	Température de l'air ambiante minimale en °C	Température de l'air ambiante maximale en °C
Tempéré	19,33	26,03
Chauffé	19,19	32,89
Refroidi	14,82	17,79
Ni chauffé, ni refroidi	16,2	26,23

Le Tableau 5 permet d'affirmer que les zones sont maintenues proche de la température limite assignée sauf pour l'enceinte de la patinoire qui, au mois d'août, atteint une température de 17,8 °C pendant les heures de match. Dans les zones tempérées, la température est significativement haute notamment celle de la zone de l'infirmierie qui enregistre plusieurs heures des valeurs supérieures à 30 °C et avec un maximum de 32,9 °C

Les puissances de chauffage permettant d'atteindre les températures de consignes selon la stratégie de régulation de chaque zone sont automatiquement définies à partir d'un chauffage idéal sans limite de puissance fournis.

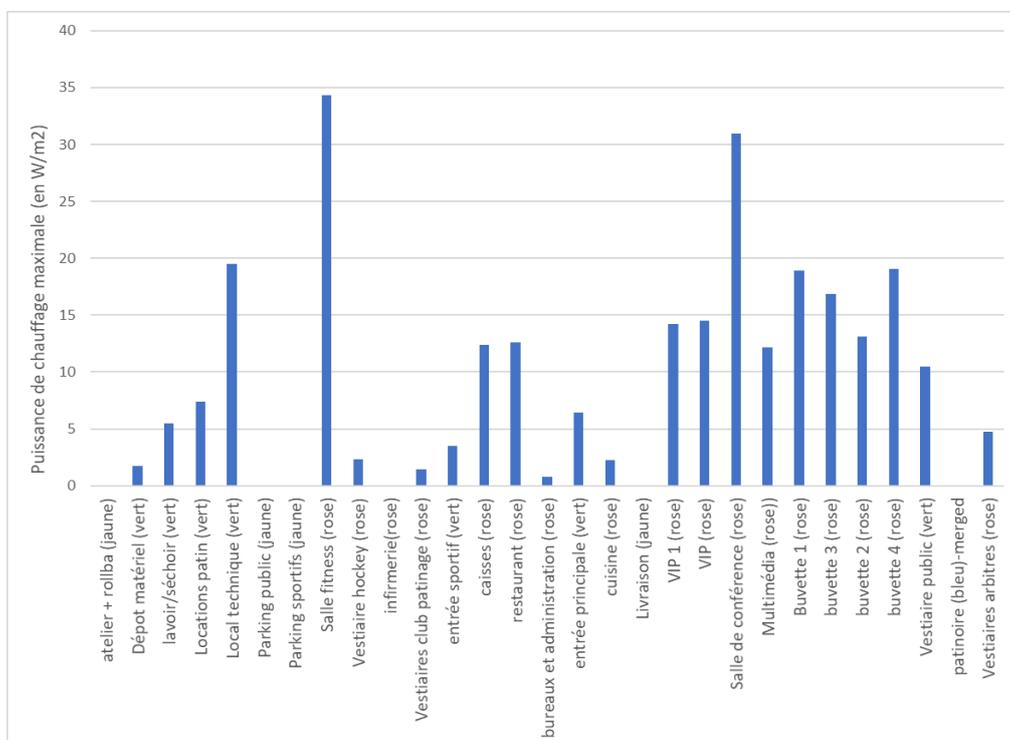


Figure 18 : Puissance de chauffage maximale par zone

La Figure 18 indique la puissance maximale de chauffage pour chaque zone afin de dimensionner les besoins en chauffage. La zone « refroidie » (enceinte de la patinoire) et les zones « ni chauffées , ni refroidies » (atelier-rolba, parking public et sportif, livraisons) n'ont aucunement besoin d'être chauffées pour maintenir les températures souhaitées.

Concernant la puissance de refroidissement maximale, seules les zones entrée des sportifs, entrée principale et l'enceinte de la patinoire ont besoin d'être refroidis. Les besoins de froid maximaux de ces trois zones sont les suivants :

- Entrée principale : 0.43 W/m<sup>2</sup>
- Entrée des sportifs : 1,561 W/m<sup>2</sup>
- Enceinte de la patinoire : 123,4 W/m<sup>2</sup>

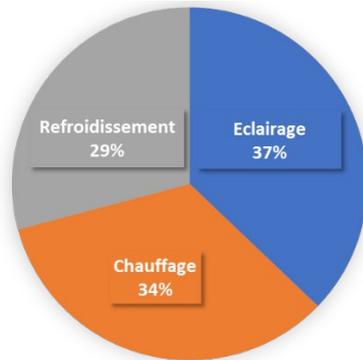


Figure 19 : Besoin énergétique annuel de chauffage, refroidissement et d'électricité pour l'éclairage

La répartition des besoins énergétiques des trois principaux vecteurs est donnée par la Figure 19. Avec un besoin de 771 MWh annuellement au cumulé de ces trois postes de dépense énergétique, ces besoins sont assez équitablement répartis avec un besoin énergétique légèrement supérieur à hauteur de 37% concernant l'énergie électrique liée à l'éclairage.

### 3.2.2 Température dans l'enceinte de la patinoire

La température dans l'enceinte de la patinoire est un élément critique pour le maintien de la température de la glace à la valeur souhaitée. L'objectif est de garder une température constante de 15°C (+/- 1°C).

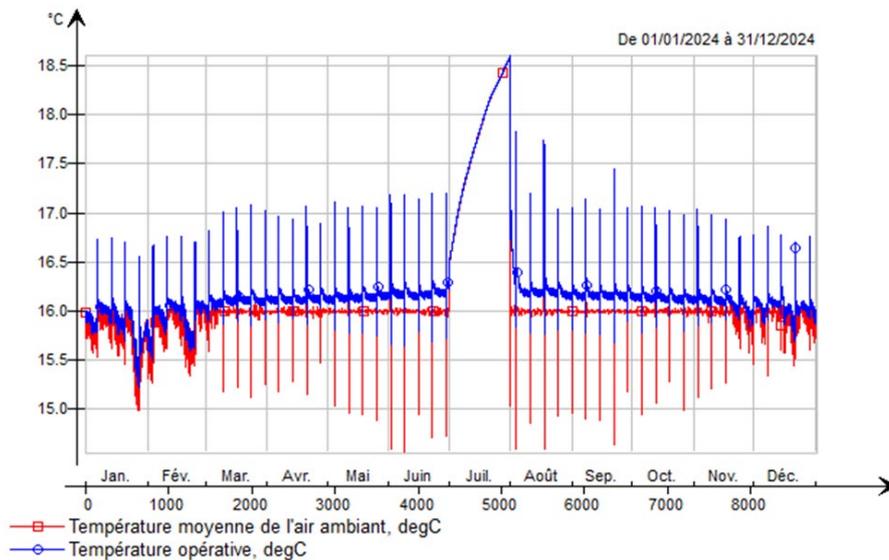


Figure 20: Température opérative et ambiante au sein de la patinoire durant l'année

La Figure 20 permet de visualiser la variation de température au sein de la patinoire sur une année de simulation. Sur les mois les plus froids (deux premiers et derniers mois de l'année) la température moyenne de l'air ambiant oscille entre 15 et 16 degrés. Le reste du temps, sur la période d'activité de la patinoire, la température est maintenue à 16 °C par refroidissement. Lors du mois de juillet, la température dans l'enceinte augmente jusqu'à 18.6 °C. La fermeture de la patinoire avec l'arrêt des systèmes de chauffage et de refroidissement provoque une stabilisation générale de température au sein de l'enceinte du bâtiment.

La patinoire monte en température à cause des échanges thermiques avec les murs en contact avec l'enceinte.

### 3.2.3 Influence d'un match sur la patinoire

Lors d'un match, le nombre de personnes entrant dans le bâtiment modifie de façon drastique le bilan thermique. Avec près de 9000 personnes en plus dans le bâtiment dès l'ouverture des portes lors d'un match dont 8000 présents dans la zone patinoire avec un gain de chaleur de 95,6 W en moyenne par personne, la puissance thermique engendrée par ce public est d'environ 760 kW. Le reste des personnes sont dispatchées dans les différentes zones de la patinoire (salle de conférence, VIP, buvette...)

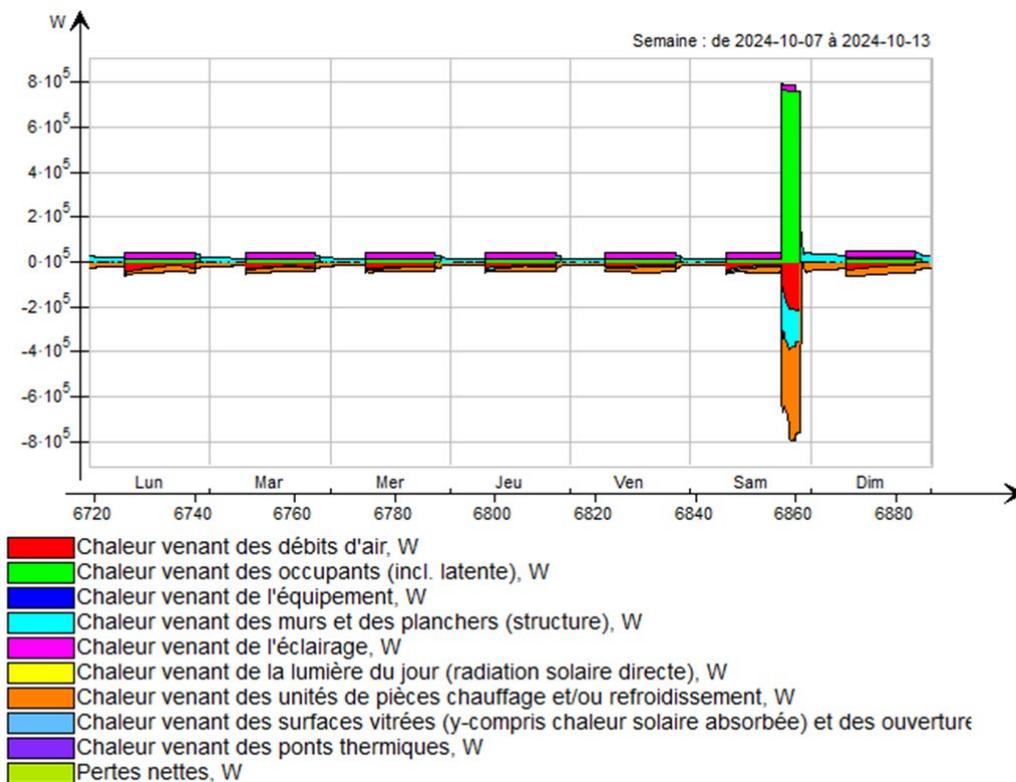


Figure 21 : Bilan thermique sur une semaine dans l'enceinte de la patinoire

La Figure 21 permet de visualiser le bilan thermique de la zone patinoire sur une semaine typique du 7 octobre 2024. L'augmentation des besoins de refroidissement pour contrebalancer l'apport énergétique engendré par le public lors du match du samedi est mise en évidence. La puissance de refroidissement passe de 25 kW en moyenne sur l'heure juste avant la période de match à 416 kW en moyenne sur l'heure où le match débute durant cette semaine.

La Figure 22 permet de visualiser l'évolution de la température opérative (indicateur prenant en compte l'effet de la convection et du rayonnement) et de la température de l'air ambiant dans la zone patinoire sur la journée du samedi 10 octobre. A noter que, pour définir la puissance de chauffage ou de refroidissement à envoyer à chacune des zones, le modèle utilise un contrôle PID. Lors de l'arrivée massive du public dans la zone patinoire, le contrôleur doit stabiliser les besoins énergétiques pour répondre à la stratégie de régulation de la zone. Ceci induit pendant un court laps de temps une montée en température dans la zone. De même lorsque le public sort à la fin du match, la température chute car le besoin de froid devient moins élevé que la puissance de froid jusqu'à lors envoyée dans la zone. Entre ces deux moments critiques, la température reste stable dans l'enceinte de la patinoire.

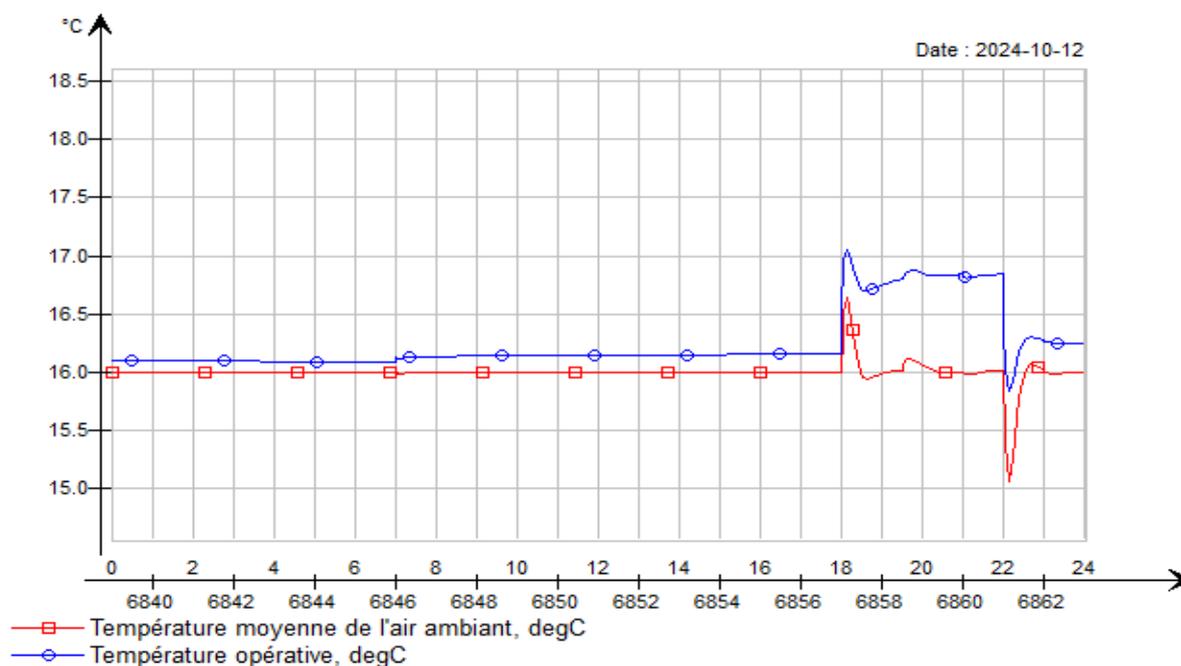


Figure 22 : Température moyenne de l'air ambiant et opérative dans la zone patinoire durant le samedi 10 octobre

### 3.2.4 Besoin énergétique mensuel

Les résultats des besoins mensuels en chauffage et refroidissement de la Figure 23 montrent une grande disparité selon la période. En hiver, l'air provenant du débit d'air thermiquement actif simulant la centrale de traitement de l'air permet de refroidir suffisamment la patinoire. En revanche ce débit d'air thermiquement actif et les pertes part les surfaces dans les zones chauffées nécessite un besoin de chauffage plus important pendant les mois d'été. A contrario, durant la période estivale, le besoin de froid augmente pour maintenir la patinoire aux limites fixées et le besoin de chauffage diminue.

Pour rappel, le bâtiment étant considéré comme fermé durant le mois de juillet, l'ensemble des installations techniques sont à l'arrêt et le bâtiment n'a ainsi besoin d'aucun apport énergétique durant ce mois.

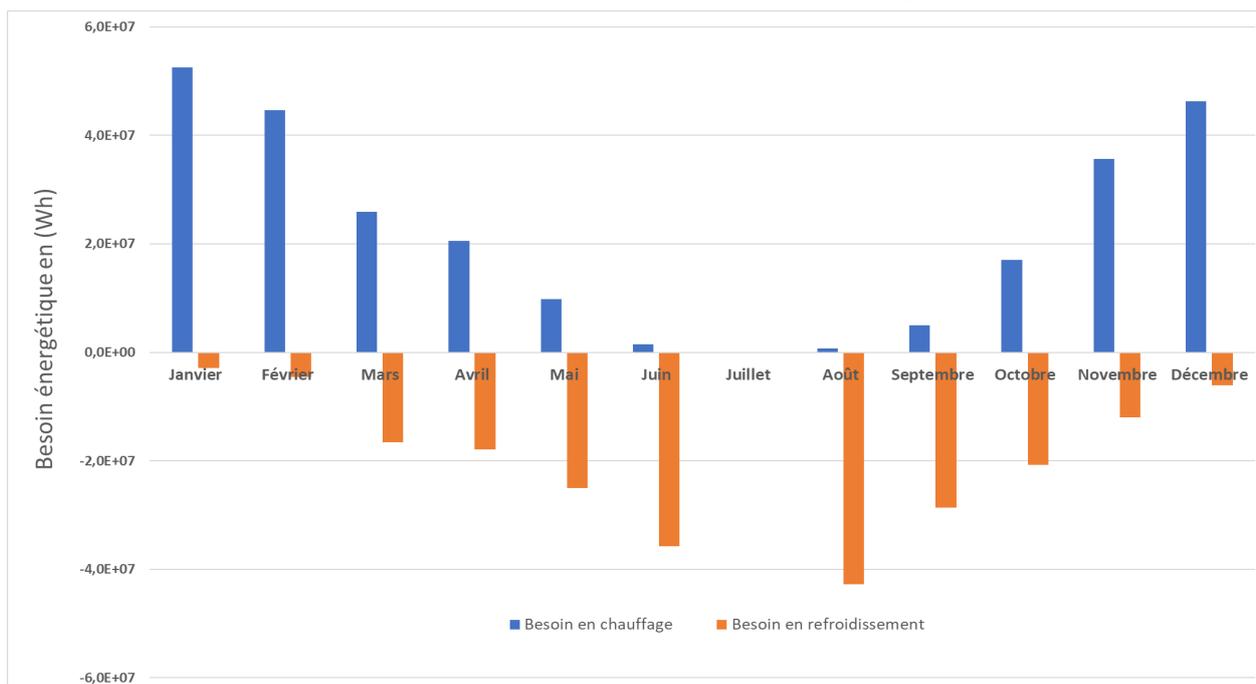


Figure 23 : Besoin mensuel de chauffage et de refroidissement dans le bâtiment

### 3.2.5 Besoin énergétique selon le climat

La Suisse est constituée de climat très distinct en fonction de l'endroit d'implantation d'un bâtiment. Le modèle de référence modélise le climat sur la plateau Suisse avec la station météo de Bern Liebefeld. Trois autres variantes avec des climats différents ; Lugano pour un climat doux, Adelboden pour un climat préalpins et Zermatt climat alpins ont été implémentées.

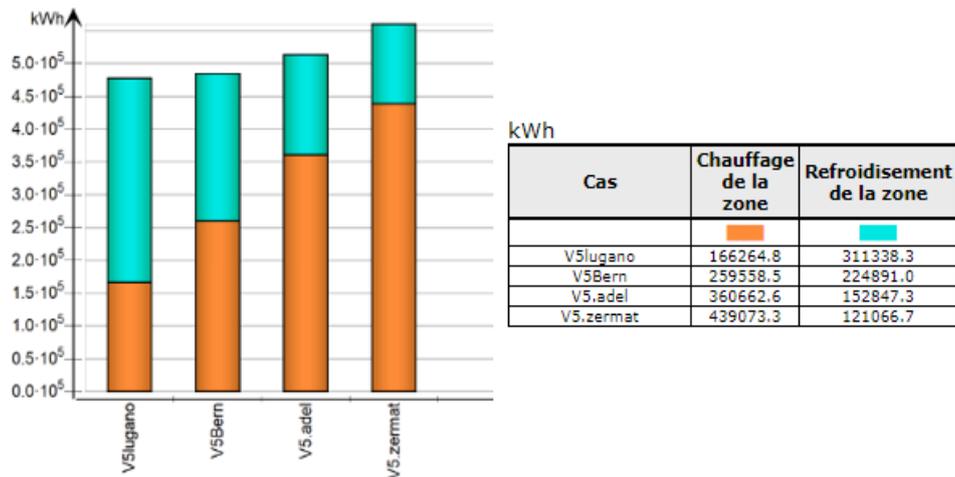


Figure 24 : Besoin de chaud et de froid pour 4 climats de la suisse défini par 4 stations météorologiques

La Figure 24 permet de visualiser le besoin de chauffage et de refroidissement de l'ensemble du bâtiment suivant les 4 climats définis précédemment. La température extérieure des différents climats a un impact direct sur les besoins énergétiques du bâtiment.

La Figure 25 met en évidence la disparité de la température extérieure mois par mois entre les 4 climats simulés. Plus le climat est doux comme à Lugano, moins les besoins de chauffage sont élevés mais les besoins de refroidissement sont eux supérieurs en comparaison à un climat rude comme celui de Zermatt. Avec un débit d'air thermiquement actif directement liée par un modèle de fuite entre une surface extérieure et la zone à refroidir, plus la température de l'air extérieur est basse, plus ce débit d'air thermiquement actif va permettre de réduire la température de la zone à refroidir.

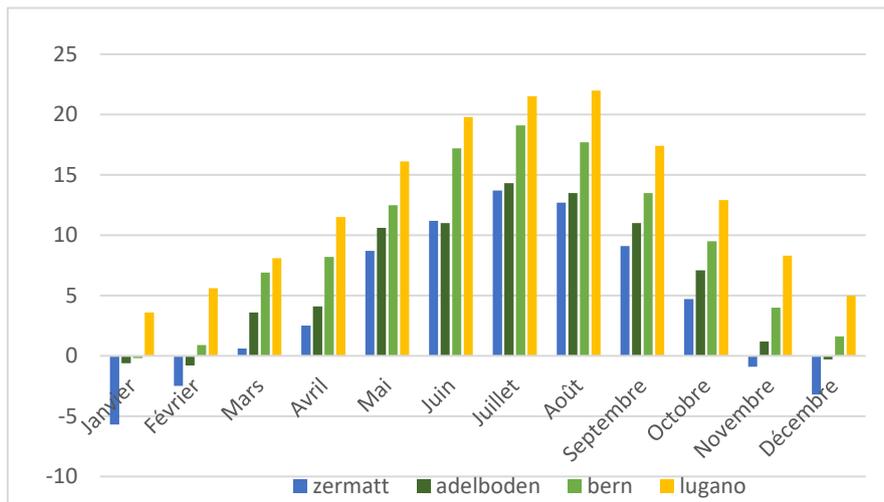


Figure 25: Température de l'air extérieur moyenne selon le mois de l'année pour les 4 climats simulés

A contrario, pour les climats plus rudes avec des stations météorologiques situées à Adelboden ou à Zermatt, les pertes par l'enveloppe thermique et le débit d'air thermiquement actif sont plus importantes pour les zones chauffées. Au total, entre les besoins de chauffage et de refroidissement, les climats plus rudes sont désavantagés car les températures froides affectent plus les zones chauffées que les températures chaudes n'affectent les zones refroidies.

## 4 Options d'optimisations avec calculs de leur impact

Dans ce chapitre, les résultats des pistes d'optimisations présentées aux chapitres 3 et 4 sont quantifiés. Pour la partie génie civil, ce sont l'impact énergétique du remplacement des isolants traditionnels par des isolants biosourcés ainsi que la construction d'une dalle de glace avec un vide sanitaire par opposition à une dalle de glace classique.

Pour la partie des installations énergétiques, il s'agit en particulier du choix des machines frigorifiques et du réfrigérant, des possibilités d'assurer la production d'eau chaude sanitaire et le chauffage avec les rejets de chaleur des machines frigorifique, de l'impact de l'émissivité des surfaces visibles depuis la glace dans la patinoire et de l'éclairage.

Ensuite, une synthèse de la combinaison des optimisations est présentée au chapitre 5.3, suivi d'un aperçu des possibles synergies des patinoires avec les piscines en particulier et de l'impact que cela peut avoir sur le choix des machines frigorifiques.

### 4.1 Génie civil

#### 4.1.1 Isolants biosourcés

Le modèle de la patinoire a été construit avec comme principal isolant de l'EPS. Pour réduire l'impact environnemental du bâtiment, l'utilisation d'isolants biosourcés est une possibilité. Rappelons que selon la KBOB, les panneaux isolants en fibres végétales émettent environ 10 fois moins d'émissions de gaz à effet de serre que l'EPS. Les panneaux en fibres mou sont données à 0.725 kg.CO<sub>2</sub>-eq tandis que le l'EPS est donnée à 7.6 kg.CO<sub>2</sub>-eq.

Une variante du bâtiment composé d'un isolant biosourcé (mixte entre chanvre, coton et lin<sup>19</sup>) à la place de l'EPS a été étudiée. Les caractéristiques du panneau isolant sont les suivantes :

- Conductivité thermique : 0.038 W/(m.k)
- Densité : 30 kg/m<sup>3</sup>
- Capacité thermique : 1800 J/(kg.k)

Tableau 6: Effet du remplacement d'un isolant traditionnel par un isolant biosourcé sur les performances thermiques des murs et surfaces de la patinoire type

Designation	Variante de référence Valeur U (W/m <sup>2</sup> .K)	Variante isolant bio- sourcé : Valeur U (W/m <sup>2</sup> .K)	Ecart relatif en % entre les deux va- riantes
Mur extérieur	0,1337	0,1589	18,84
Mur intérieur entre deux locaux	0,1457	0,1761	20,86
Mur intérieur en contact avec la pa- tinoire	0,1477	0,1792	21,32
Plancher extérieur	0,1467	0,1467	21,06
Plancher intérieur	0,1473	0,1786	21,24
Toiture	0,1155	0,1338	15,84

<sup>19</sup> [HTTPS://WWW.MATERIAUX-NATURELS.FR/PRODUIT/1116-BIOFIB-TRIO-PANNEAU-ISOLANT-CHANVRE-COTON-LIN](https://www.materiaux-naturels.fr/produit/1116-biofib-trio-panneau-isolant-chanvre-coton-lin)

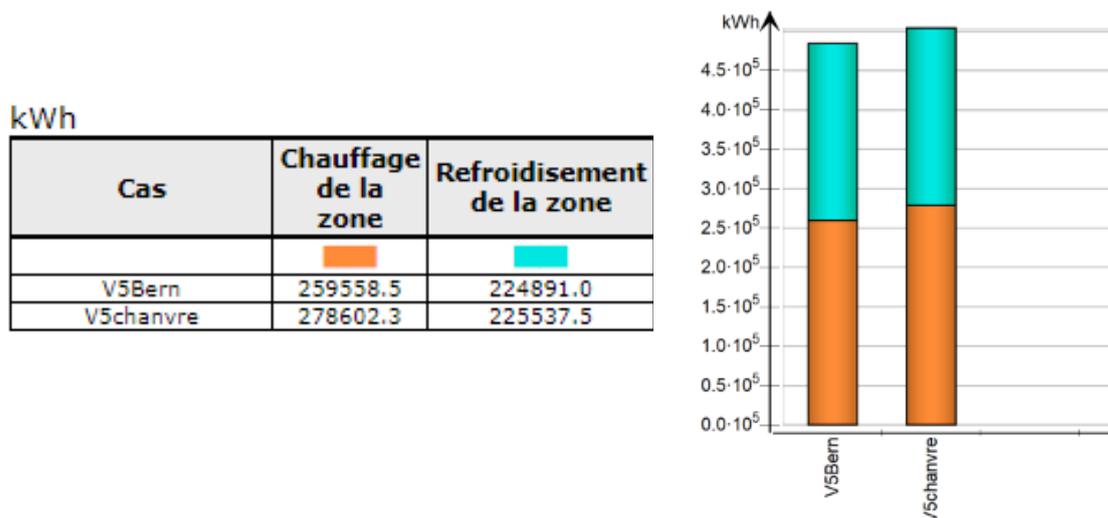


Figure 26 : Besoins de chauffage et de refroidissement pour la variante avec l'isolation en EPS et l'isolation biosourcée

Les besoins de froid dans la zone sont peu sensibles à l'augmentation de la valeur U des composants structurels de la patinoire. Ceci s'explique par le fait que les déperditions thermiques entre les murs de la patinoire et les locaux adjacents sont compensées par les apports thermiques provenant de la toiture. En revanche l'augmentation des besoins de chauffages est lui plus marquée avec un écart de 29 kWh entre les deux variantes soit une augmentation de 7,3%.

A noter que pour avoir la même résistance thermique que les 20 cm d'EPS, il faut avoir une épaisseur équivalente de 24,5 cm avec l'isolant biosourcé.

#### 4.1.2 Vide sanitaire sous la dalle de glace

L'introduction d'un vide sanitaire sous la dalle de glace a pour but de réduire les gains thermiques (pertes de froid) du sol vers le circuit réfrigérant servant à maintenir la couche de glace. Cette optimisation a également pour but d'éviter des problèmes de gel dans les fondations de manière passive. Les pertes thermiques à travers une couche de 20 cm d'XPS ( $\lambda = 0.033 \text{ W/m.K}$ ) est de l'ordre de 5 kW pour une température du sol à 3°C et une température du béton réfrigéré à -13°C. En ajoutant un vide sanitaire entre la couche d'XPS et le sol en dessous, il serait possible de réduire ces 5 kW de pertes thermiques. Cependant, le faible potentiel d'économie énergétique ne justifie probablement pas la complexité supplémentaire de la mise en œuvre.

Le vide sanitaire sous la dalle de glace n'est donc pas une optimisation énergétique très prometteuse, même si elle peut potentiellement être intéressante dans le but d'éviter des problèmes de ponts de froid entraînant de la condensation et du gel sur les surfaces de locaux qui se trouveraient sous la dalle de glace. Si cette dernière repose sur le sol, cette optimisation permettrait d'économiser le circuit hydraulique maintenant le sol hors-gel et ainsi également la consommation électrique de son circulateur.

## 4.2 Installations énergétiques

### 4.2.1 Production de froid

Les besoins de froid d'une patinoire pour maintenir la glace sont nécessaires pour compenser les gains thermiques présentés plus haut. Compenser l'apport thermique par convection naturelle entre la glace et l'air ambiant nécessite une puissance de froid constante de 147 kW pour une glace maintenue à -5°C et de l'air ambiant à 15°C. Le seul moyen de diminuer cette puissance est de diminuer la température de l'air dans l'enceinte ou plus localement au contact de la glace. Un concept de ventilation permettant de diminuer la température de l'air au contact de la glace tout en maintenant les tribunes suffisamment chaudes est présenté au chapitre 4.2.3.

Tableau 7: Besoins de froid nécessaire au maintien de la glace

Source	Puissance [kW]
<b>Convection naturelle</b>	147
<b>Rayonnement</b>	90
<b>Conduction (vers le sol)</b>	5
<b>Evaporation/Sublimation</b>	1
<b>Pompe</b>	9
<b>Total</b>	<b>252</b>

Des mesures directes à la Vaudoise Arena ainsi qu'une estimation basée sur un modèle d'échange radiatif entre la glace et l'enceinte de la patinoire ont montrés que la rayonnement net sur la glace est responsable de 90 kW de gains thermiques. Il est possible de réduire cet échange radiatif, en particulier en utilisant des matériaux et revêtement à basse émissivité dans l'enceinte de la patinoire. L'estimation numérique semble indiquer une valeur de 10 kW avec une enceinte d'émissivité de 0.15 (standard Minergie pour les patinoires dont la glace refroidie par un circuit secondaire monophasique <sup>20</sup>). Cependant, en l'absence de mesures expérimentales pour le confirmer, ce potentiel de diminution de la puissance froide n'est pas pris en compte dans la suite de ce travail, étant donné que la fiabilité de l'estimation numérique n'est pas suffisamment garantie.

Les phénomènes de convection naturelle et de rayonnement infrarouge sont les deux sources de chaleur déterminantes pour la puissance de refroidissement nécessaire. Le circuit frigorifique doit également éliminer la chaleur provenant par conduction du sol sous la glace. Comme discuté au chapitre 4.1.2, cette puissance n'est que de 5 kW à travers une couche d'XPS de 20 cm, soit 2.5% de la puissance totale. Finalement, la puissance de la pompe transmise au fluide est transformée en chaleur à travers les pertes de charges dans le circuit frigorifique et contribuent ainsi à augmenter la puissance requise de pompage. Une valeur de 9 kW correspond à la puissance de pompage maximale admise pour ce modèle de patinoire afin de respecter le standard minergie de  $0.035 \text{ kW}_{\text{pompe}}/\text{kW}_{\text{froid}}$  <sup>20</sup>.

Pour limiter le nombre de cas de figure (zones climatiques, fluide de travail des machines frigorifique, etc.), une puissance froide constante de 252 kW est admise pour le dimensionnement des machines frigorifiques.

Tableau 8: Flux thermiques d'une patinoire - puissance nominale et besoin annuel pour le cas de Berne (plateau Suisse) et Zermatt (climat alpin)

Flux thermiques	Puissance nominale [kW]	Energie annuelle [MWh]
<b>Maintien de la glace</b>	-252 / -252	2020 / 2020
<b>Puits de fonte de glace</b>	23 / 23	184 / 184
<b>Eau à 60°C (ECS + surfacage)</b>	53 / 53	425 / 425
<b>Chauffage</b>	45 / 120	260 / 439
<b>Climatisation (*)</b>	-54 / -18	225 / 121
<b>Déshumidification (*)</b>	-61 / -61	96 / 96

Les flux thermiques en jeu dans une patinoire sont représentés dans le Tableau 8. Les puissances nominales des différents besoins de chaleur, soit le puits de fonte de glace, la production d'eau chaude à 60°C pour l'ECS et l'entretien de la glace ainsi que le chauffage du bâtiment peuvent potentiellement être couvertes par les rejets de chaleur des machines frigorifiques. Dans la variante de base – patinoire non optimisée utilisant le R404a comme réfrigérant principal – ces besoins de chaleur sont couverts au maximum par les rejets des machines frigorifiques. Pour le reste, une pompe à chaleur de COP 5 est utilisée – avec un COP relativement élevé étant donné que les rejets de chaleur des machines frigorifiques peuvent

<sup>20</sup> MINERGIE : EXIGENCES SUPPLÉMENTAIRES POUR LES PATINOIRES, VERSION 2020.1

normalement être utilisés comme source froide pour une PAC produisant de l'ECS. Cela correspond à une PAC propane générique travaillant entre 30°C (évaporateur) et 65°C (condenseur).

Les besoins de froid pour la climatisation des locaux le nécessitant et pour la déshumidification de l'air dans l'enceinte de la patinoire ne sont pas nécessairement fournis par les machines frigorifiques produisant le froid pour le maintien de la glace. En effet, le froid peut être fourni pour ces deux applications à un plus haut niveau de température – environ 2°C pour la déshumidification et 10-15°C pour la climatisation. Du fait de ces températures plus élevées, une machine frigorifique dédiée aura un meilleur rendement. Pour ces besoins, deux PAC propane génériques avec un COP de 5 (2°C / 35°C) et un COP de 7 (10°C / 35°C) sont utilisées. Cette approche sert à comparer les consommations électriques de patinoires non-optimisées et optimisées. En utilisant uniquement des pompes à chaleur pour assurer les flux thermiques, tous les besoins en énergie finale sont ainsi sous forme d'électricité et les comparaisons entre les différentes variantes.

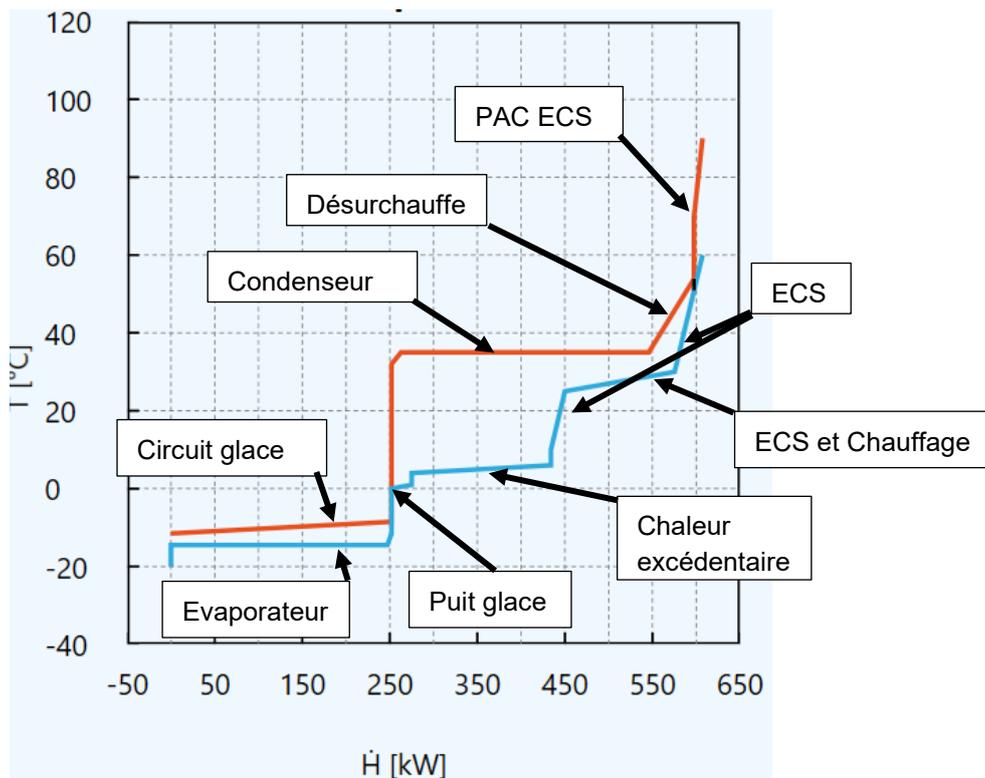


Figure 27: Flux thermiques avec machines frigorifiques R404a pour une patinoire de référence

La Figure 27 est une représentation réalisée avec le logiciel PinCH des flux thermiques présentés dans le Tableau 8.

Seuls les flux en lien avec les machines frigorifiques maintenant le glace sont représentés. La courbe bleue représente le niveau de température de demande de chaleur – sous forme d'une différence d'enthalpie. La courbe orange représente les flux à refroidir et donc la température à laquelle ils peuvent fournir leur énergie thermique. Plus les courbes sont plates, plus la différence d'enthalpie est grande pour une faible variation de température.

La représentation de la Figure 27 est pour le cas hivernal de la patinoire dans un climat alpin (Zermatt), c'est-à-dire avec une demande de chaleur maximale. Pour ce cas de base, le fluide primaire est le R404a, avec une température d'évaporateur de -14.5°C et de condenseur de 35°C. Ces températures prennent en compte des  $\Delta T$  de 3 K avec le circuit frigorifique (-11.5°C/-8.5°C) et le circuit de chauffage (32°C). La surchauffe en sortie d'évaporateur et le sous-refroidissement en sortie de condenseur sont de 3 K. Le rendement isentrope du compresseur de 0.7 et l'efficacité de l'entraînement mécanique de 0.9. Dans ces conditions, une puissance électrique de 115 kW est nécessaire pour fournir les 252 kW froid à la glace, soit un COP de 3.29.

Sur la partie gauche de la Figure 27, le flux chaud (besoin de chaleur – en bleu) de l'évaporateur est assuré par le flux froid (besoin de refroidissement – en orange) du circuit frigorifique (circuit glace).

La chaleur de condensation du R404a permet de fournir les 23 kW sont a besoin de puit de glace pour faire fondre la glace abrasée lors du surfacage et ainsi permettre de réutiliser cet eau. Cette chaleur permet également d'assurer les besoins en chauffage ainsi que le préchauffage de l'ECS et de l'eau de surfacage, ce qui représente une puissance de 142 kW. Un excédent de chaleur au condenseur de 142 kW est encore disponible, idéalement pour les utilisations annexes, comme chauffer une piscine ou alimenter un réseau d'anergie. Si aucune possibilité de récupération de chaleur n'est possible, alors elle doit être évacuée dans l'environnement. Finalement, tout à droite de la Figure 27, une PAC ECS fournit les 32 kW restants pour chauffer l'eau à 60°C, nécessitant une puissance électrique de 6.4 kW selon les hypothèses (COP = 5.0) précédemment mentionnées.

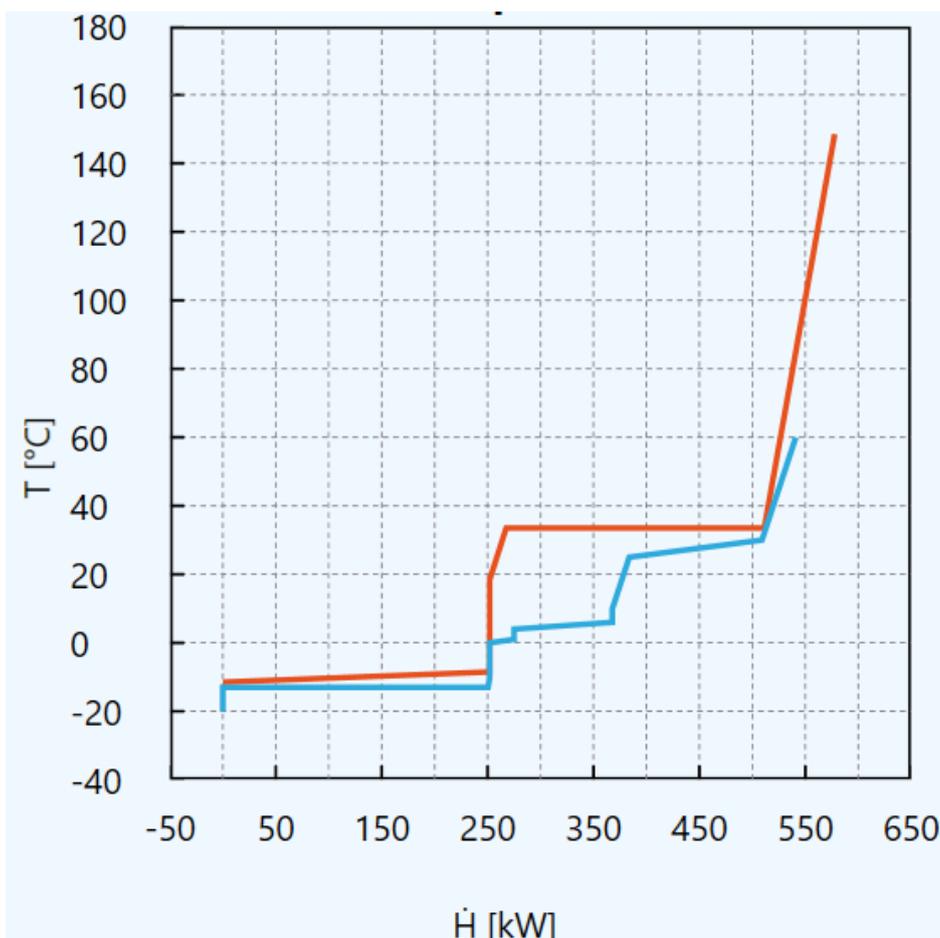


Figure 28: Flux thermiques avec machines frigorifiques R717 pour une patinoire optimisée

La représentation de la Figure 28 est pour le cas hivernal de la patinoire dans un climat alpin (Zermatt), c'est-à-dire avec une demande de chauffage maximale. Pour ce cas optimisé, le fluide primaire est le R717 (ammoniac,  $\text{NH}_3$ ), avec une température d'évaporateur de  $-13^\circ\text{C}$  et de condenseur de  $33.5^\circ\text{C}$ . Ces températures prennent en compte des  $\Delta T$  de 1.5 K avec le circuit frigorifique ( $-11.5^\circ\text{C}/-8.5^\circ\text{C}$ ) et le circuit de chauffage ( $32^\circ\text{C}$ ). La surchauffe en sortie d'évaporateur est de 3 K et le sous-refroidissement en sortie de condenseur est de 15 K. Le rendement isentrope du compresseur de 0.7 et l'efficacité de l'entraînement mécanique de 0.9. Dans ces conditions, une puissance électrique de 82 kW est nécessaire pour fournir les 252 kW froid à la glace, soit un COP de 3.98.

Les différences de températures à l'évaporateur et au condenseur, ainsi que la désurchauffe de 15 K sont les exigences minimales pour une patinoire de standard Minergie<sup>20</sup>. En particulier, la désurchauffe en sortie du condenseur permet d'augmenter le COP des pompes à chaleur.

Le bassin de fonte de glace représente une opportunité pour la réalisation de la désurchauffe de l'ammoniac en sortie de condenseur. En effet, les 23 kW (en moyenne) nécessaires à cette fonte offrent un puits de chaleur à basse température permettant une désurchauffe jusqu'à  $18.5^\circ\text{C}$ , et même probablement plus bas. Dans le dossier de soumission pour le label Minergie de la ZSC Lions Arena, les auteurs mentionnent que la désurchauffe ne permet de couvrir que 70% des besoins de leur puits de fonte de glace, rendant un

apport de chaleur du condenseur également nécessaire. Les résultats présentés en Figure 28 sont cohérents avec cette réflexion, comme la désurchauffe représente 15 kW sur 23 kW nécessaires, soit 65%.

En raison de sa température de sortie de compresseur très élevée, environ 150°C, la désurchauffe de l'ammoniac permet de couvrir l'entier des besoins en ECS et eau de surfaçage, avec encore 18 kW de chaleur à haute température disponible. Les besoins en chauffage peuvent aussi être complètement couverts même dans le cas le plus extrême (climat alpin en hiver). Dans cette variante, les excédents de chaleur au condenseur atteignent 95 kW, disponibles pour des piscines, réseaux d'énergie ou à dissiper dans l'environnement.

L'alternative à l'ammoniac pour optimiser les machines frigorifiques, comme expliqué au chapitre 2.2.2, est le CO<sub>2</sub>. Autant le CO<sub>2</sub> que l'ammoniac ont l'avantage de pouvoir couvrir tout ou partie des besoins de chaleur à haut niveau de température d'une patinoire. Dans le cas des pompes à chaleur à CO<sub>2</sub>, une demande significative en chaleur à bas niveau de température est toutefois également nécessaire afin d'assurer un fonctionnement efficace <sup>21</sup>. Comme le montre la Figure 29, les cycles transcritiques des pompes à chaleur CO<sub>2</sub> permettent de fournir de la chaleur sur une plage de températures plutôt qu'un niveau fixe lors de la condensation d'un fluide. L'avantage principale est une plus grande fraction de la chaleur pouvant être fournie à un haut niveau de température. Les études réalisées dans les climats froids, tels que la Suède <sup>6</sup> et le Canada <sup>21</sup> indiquent des baisses de consommation électriques significatives en passant de l'ammoniac au CO<sub>2</sub>.

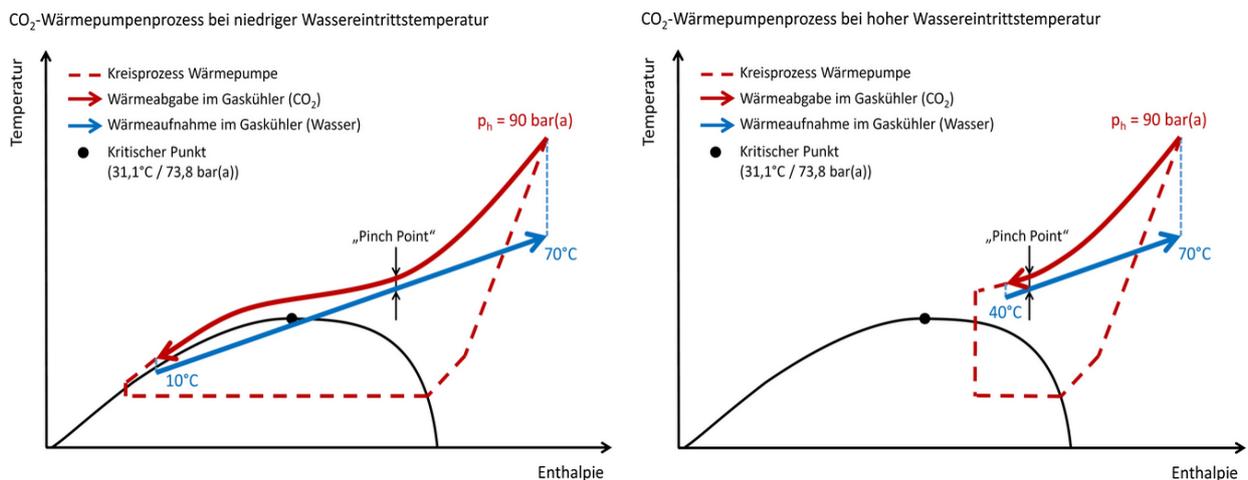


Figure 29: Cycle thermodynamique d'une pompe à chaleur CO<sub>2</sub>

Le profil de demande de chaleur d'une patinoire est très important dans le cas où le CO<sub>2</sub> est utilisé comme fluide principal. Si les demandes de chaleur à bas niveau de température sont insuffisantes, alors le cycle CO<sub>2</sub> transcritique ne fonctionne pas efficacement (Figure 29, à droite). Afin d'obtenir des COP performances intéressantes avec une pompe à chaleur à CO<sub>2</sub>, il est nécessaire d'avoir une utilité pour de la chaleur entre 10°C et 30°C, afin de pouvoir profiter de l'enthalpie de condensation du CO<sub>2</sub>. Si ce n'est pas le cas, un mélange déjà partiellement gazeux sera présent à l'entrée de l'évaporateur, limitant ainsi fortement la chaleur (puissance froide) nécessaire à évaporer le reste du CO<sub>2</sub>. Etant donné que les seules demandes de chaleur en dessous de 30°C présentes dans les patinoires suisses sont le puit de fonte de la glace et le préchauffage de l'ECS, il est fort probable qu'il ne doit pas être possible de suffisamment refroidir le CO<sub>2</sub> de machines frigorifiques transcritiques. Les performances exactes des cycles CO<sub>2</sub> transcritiques ne sont pas calculées dans ce rapport en raison de leur complexité et du manque à priori de demande de chaleur à bas niveau de température dans le modèle de patinoire type étudié.

<sup>21</sup> COMPARATIVE STUDY OF REFRIGERATION SYSTEMS FOR ICE RINKS, NATURAL RESOURCES CANADA, 2013

## 4.2.2 Chauffage et ECS

Comme discuté au chapitre 4.2.1, les rejets de chaleur des machines frigorifiques maintenant la glace permettent de couvrir l'ensemble des besoins de chauffage et ventilation ainsi que toute ou partie des besoins en ECS et eau de surfaçage. En particulier, l'ammoniac et le CO<sub>2</sub> conviennent à la production d'ECS, toutefois avec quelques contraintes <sup>21</sup>. Dans le cas de l'ammoniac, l'utilisation d'un circuit intermédiaire afin d'éviter les fuites toxiques d'ammoniac dans l'eau chaude sanitaire. Dans le cas du CO<sub>2</sub>, un boiler résistant aux hautes pressions est nécessaire, puisque le CO<sub>2</sub> atteint environ 90 bar en sortie de compresseur.

Tableau 9: Bilan annuel de l'utilisation des rejets de chaleur de la production de froid en MWh pour une PAC NH<sub>3</sub>

Demande [MWh]	Lugano	Berne	Adelboden	Zermatt
<b>ECS + Surfaçage</b>	168	168	168	168
<b>Chauffage</b>	166	260	360	439
<b>Puits de glace</b>	184	184	184	184
<b>Excédent</b>	2423	2329	2229	2150
<b>Déficit ECS</b>	257	257	257	257

Comme le montre le Tableau 9, les rejets des machines frigorifiques d'une patinoire non optimisée, utilisant du R404a (ou une alternative similaire) comme fluide principal, permettent de couvrir l'entier de la demande de chaleur pour le chauffage et le puits de fonte de glace. En revanche, seulement 40% des besoins en ECS et eau de surfaçage peuvent être couverts directement. Au cours de l'année, environ 86% de la chaleur produite par les machines frigorifiques est rejetée, soulignant l'intérêt de trouver d'y trouver une utilité.

Tableau 10: Bilan annuel de l'utilisation des rejets de chaleur de la production de froid en MWh pour une PAC NH<sub>3</sub>

Demande [MWh]	Lugano	Berne	Adelboden	Zermatt
<b>ECS + Surfaçage</b>	425	425	425	425
<b>Chauffage</b>	166	260	360	439
<b>Puits de glace</b>	184	184	184	184
<b>Excédent</b>	1902	1808	1708	1629

Dans le cas d'une patinoire utilisant du NH<sub>3</sub> comme fluide principal (Tableau 10), l'entier des besoins de chaleur pour le puits de fonte de glace, le chauffage et l'ECS et surfaçage peuvent être couverts par les rejets de chaleur des machines frigorifiques. La part de chaleur excédentaire diminue de 86% à 68%, en partie par la couverture du besoin d'ECS en entier et en partie par la diminution de la puissance au condenseur des machines frigorifiques, celles-ci ayant un meilleur COP (3.98 contre 3.29).

L'utilisation des rejets de chaleur des machines frigorifiques pour les divers besoins de chaleur peut se faire sans stockage particulier. En effet, ce sont tous des procédés quasiment continus pour autant qu'un stockage d'eau chaude d'une capacité d'une journée de consommation (20'000 litres) soit installé.

### 4.2.3 Ventilation et déshumidification

Les besoins en énergie thermique pour la ventilation ont été inclus dans les besoins en chauffage et climatisation des différents volumes de la patinoire présentés au chapitre 4. En plus de ces besoins déjà pris en compte, il reste le traitement de l'air pour déshumidifier l'air de l'enceinte de la patinoire. Plutôt que de maintenir l'ensemble de l'air dans l'enceinte de la patinoire, il est possible de ventiler séparément la glace et les gradins, comme le montre la Figure 30<sup>22</sup>. Le système de ventilation représenté en vert peut ainsi maintenir une température d'air plus froide au contact de la glace. En rouge, le système de ventilation permet de maintenir une température de l'air plus chaude dans la zone des gradins, afin de garantir le confort thermique des spectateurs.

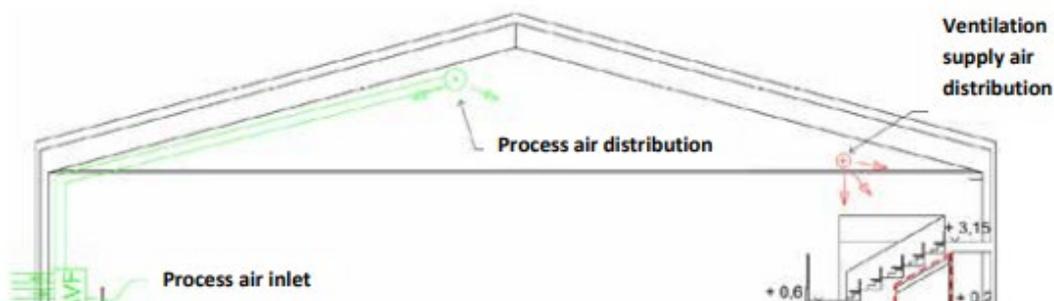


Figure 30: Concept de ventilation/déshumidification de l'enceinte d'une patinoire

Un tel concept de ventilation permettrait d'abaisser la température de l'air au contact de la glace tout en maintenant les gradins suffisamment chaud pour les spectateurs. Cependant, l'illustration montre seulement six rangées de sièges et une paroi en bord de glace de hauteur significative comparée à la hauteur des gradins et la hauteur de la toiture. Dans le cas d'une grande patinoire, comme celles discutées dans ce rapport, les gradins dominent largement la paroi en bord de glace. Il est possible qu'un tel concept de ventilation soit plus difficilement réalisable dans un tel cas, puisque les obstacles au flux d'air entre les gradins et la glace sont comparativement plus petits. Une simulation CFD plus poussée, idéalement pour un cas concret, permettrait de quantifier les avantages d'une telle approche pour des grandes patinoires ainsi que d'identifier les configurations efficaces, si elles existent.

La ventilation dans l'enceinte de la patinoire n'est toutefois pas uniquement nécessaire au confort thermique, mais également pour la déshumidification. Il est nécessaire de maintenir une humidité absolue basse dans l'enceinte, afin d'éviter la formation de brouillard au niveau de la glace, en particulier lors des matchs où beaucoup de spectateurs sont présents.

L'approche classique pour déshumidifier l'air, comme discuté précédemment, consiste à refroidir l'air à 4°C afin d'atteindre une humidité relative de 5 g<sub>eau</sub>/kg<sub>air</sub>. Même avec une récupération de 90% de la chaleur nécessaire à refroidir l'air à 4°C puis la réchauffer à 15°C, cela représente une puissance chaude et une puissance froide de respectivement 12 kW hors période de match (débit de 32'000 m<sup>3</sup>/h) et 61 kW pendant les matchs (débit de 160'000 m<sup>3</sup>/h). Les besoins en chaleur peuvent être couverts en utilisant les rejets des machines frigorifiques, mais les besoins en froid eux impliquent quoi qu'il en soit une consommation énergétique supplémentaire.

<sup>22</sup> IIHF GUIDE TO SUSTAINABLE ICE ARENAS

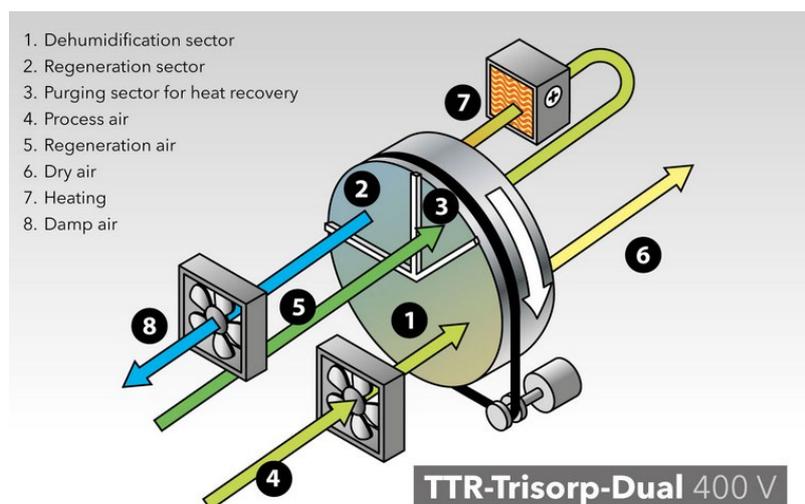


Figure 31: Déshumidification par adsorption

Une alternative à la déshumidification par refroidissement de l'air est la déshumidification avec une machine à adsorption, comme illustré sur la Figure 31<sup>23</sup>. L'avantage de cette méthode est que les roues dessicantes consomment uniquement de la chaleur (et un peu d'électricité) pour le processus de déshumidification. Un flux d'air humide, provenant de l'extérieur ou l'intérieur de la patinoire, passe à travers une section de la roue dessicante contenant un matériau adsorbant (relativement) sec. A son contact, l'humidité de l'air se fixe à la surface de ce matériau, typiquement du gel de silicat ou du zéolite (processus 4 – 1 – 6, Figure 31). Une fois le matériau trop humide, la roue tourne et le met en contact avec un flux d'air chaud, des niveaux de température entre 60°C et 90°C suffisent. Pour cela, un flux d'air traverse le quartier encore et déjà sec de la roue (point 3) – afin de préchauffer l'air et de refroidir le matériau pour que ça chauffe n'aille pas dans l'enceinte de la patinoire. L'air préchauffé passe ensuite à travers une batterie chaude (point 7) avant d'entrer en contact avec le matériau humide et de le sécher – l'eau adsorbée est libérée quand le matériau chauffe).

Avec de l'ammoniac comme fluide principal, les résultats présentés au chapitre 4.2.1, une puissance excédentaire de 18 kW à « haute température » est encore disponible après avoir couvert les besoins en ECS et eau de surfacage. Cette puissance permet d'alimenter un machine dessicante TTR2800<sup>23</sup> d'une capacité de 16 kg<sub>eau</sub>/h, permettant ainsi de déshumidifier l'air dans l'enceinte de la patinoire pendant les périodes d'utilisation normale. Pour les matchs, cette solution est toutefois largement insuffisante pour 8000 spectateurs qui libèrent au total 560 kg<sub>eau</sub>/h, nécessitant ainsi des capacités de déshumidification classiques pendant les matchs.

Tableau 11: Besoin en chaleur et froid des systèmes de déshumidification

Demande [MWh]	Chaud > 30°C [MWh/an]	Chaud < 30°C [MWh/an]	Froid [MWh/an]
<b>Déshumidification sous refroidissement</b>	0	112	112
<b>Déshumidification adsorption</b>	144	16	16

Comme le montre le Tableau 11, l'utilisation d'un déshumidificateur dessicant permet d'économiser 96 MWh de froid par an pour le traitement de l'air dans l'enceinte de la patinoire, soit une consommation électrique de 24 MWh par an (COP = 5).

<sup>23</sup> [HTTPS://UK.TROTEC.COM/APPLICATIONS/GENERAL-DEHUMIDIFICATION-SOLUTIONS/DEHUMIDIFICATION-IN-IN-DOOR-ICE-SKATING-RINKS/](https://uk.trotec.com/applications/general-dehumidification-solutions/dehumidification-in-in-door-ice-skating-rinks/)

#### 4.2.4 Eclairage haute-efficacité

Avec une consommation annuelle de 286 MWh, l'éclairage apparaît comme un poste de dépense majeur. L'optimisation de ce poste énergétique permettra à la fois de réduire l'impact économique mais aussi l'impact environnemental. Pour réduire la consommation annuelle, il est notamment important de revoir les hypothèses de départ. Actuellement le rendement lumineux considéré est de 100 lm/W. Or, à l'heure actuelle certains luminaires proposent assez couramment des rendements lumineux allant jusqu'à 180 lm/W. En prenant un rendement lumineux de 160 lm/W pour l'éclairage dans l'ensemble de la patinoire, la consommation annuelle serait réduite 37,5 % passant de 286 MWh à 179 MWh.

La deuxième hypothèse concerne la surface à éclairer dans la patinoire. Il s'avère que le dimensionnement de la puissance électrique a été calculé par rapport à la surface de toit, ceci impliquant ainsi un éclairage des gradins. Au final sur les 98h d'ouverture hebdomadaire de la patinoire, les gradins sont occupés 4h (uniquement pendant les heures de match).

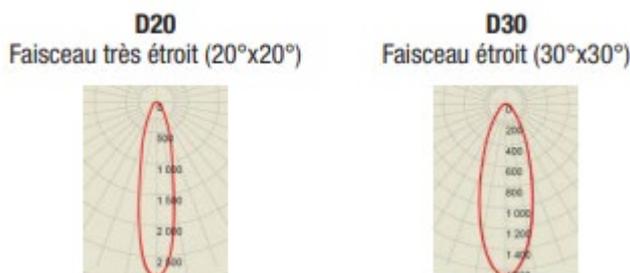


Figure 32 : Courbe photométrique pour un type de projecteur dans la patinoire

La Figure 32 permet de visualiser la courbe photométrique d'un type de projecteur<sup>24</sup> que l'on pourrait installer dans notre patinoire. Le flux lumineux est bien orienté vers la surface qu'elle regarde avec une faible dispersion du flux lumineux. Considérer comme surface de dimensionnement la surface au sol de la patinoire semble être pertinent car cela n'affectera pas l'éclairage sur la surface au sol. La surface de dimensionnement serait réduite de 42 % soit un gain sur les 179 MWh restant de 34 MWh. De plus ce luminaire est disponible en version modulaire afin d'ajuster le flux lumineux en fonction des recommandations par type de pratique sportive sur la glace.

La dernière optimisation consiste à réduire le nombre d'heures à pleine charge pour les zones entourant la patinoire. Pour réduire le nombre d'heures à pleine charge, il faut revoir les hypothèses faites sur les heures d'éclairage des différentes zones. Même s'il y a un facteur correctif de simultanéité, ce facteur est appliqué à une minorité de zones. Toutes les zones, exceptées les zones VIP, multimédia et conférence sont éclairées de 7h à 21h chaque jour de la semaine. Des zones telles que les bureaux, le restaurant ou même les quatre zones buvettes ne sont pas concernées par ce facteur. Un article<sup>25</sup> publié par l'Association suisse pour l'éclairage a par ailleurs démontré le potentiel de réduction de la consommation électrique en installant des capteurs de présence. D'après cette étude, le gain d'économie d'énergie se situe autour de 60 % pour les surfaces utiles principales. Dans notre bâtiment ce gain d'économie d'énergie se chiffrerait à 59 MWh pour l'ensemble des zones entourant l'enceinte de la patinoire.

Au final, après avoir mis en place les trois mesures d'optimisation décrites plus tôt à savoir :

- Augmenter le rendement lumineux de l'éclairage
- Dimensionner l'éclairage par rapport à la surface au sol dans l'enceinte de la patinoire
- Réduire le nombre d'heure à pleine charge pour les locaux non utilisés durant les 14 heures d'ouvertures journalières du bâtiment et installer des capteurs de présence

Ces trois mesures permettent un abaissement de la consommation électrique liée à l'éclairage de 70% avec une consommation annuelle de 86 MWh.

<sup>24</sup> PROJECTEUR COMPATIBLE AVEC NOS CAS D'ÉTUDE : [HTTPS://NEXXLED.FR/PRODUIT/VERDON-L/](https://nexxled.fr/produit/verdon-l/)

<sup>25</sup> RAPPORT SENSOLIGHT DU 22.12.23 SUR L'ÉTUDE DE CAS DE RÉSEAU INTELLIGENT : [HTTPS://PUBDB.BFE.ADMIN.CH/FR/PUBLICATION/DOWNLOAD/11635](https://pubdb.bfe.admin.ch/fr/publication/download/11635)

### 4.3 Synthèse des optimisations

L'ensemble des optimisations discutées et chiffrées dans le chapitre 4.2 permettent de réduire la consommation d'une patinoire d'environ 40%, comme présenté dans le Tableau 12. En ce qui concerne le cas de référence, les paramètres suivants sont considérés :

- Fluide principal : R404a
- Pompes pour le fluide secondaire standard Minergie (0.035 kW/kW)
- Revêtement d'émissivité standard dans l'enceinte de la patinoire
- Chauffage des locaux entièrement assuré par la récupération de chaleur
- Préchauffage de l'ECS et de l'eau de surfaçage par la récupération de chaleur, le reste avec une PAC de COP = 5
- Puit de fonte de glace alimenté par la récupération de chaleur
- Ventilation double flux, efficacité thermique de 90%
- Déshumidification de la patinoire par sous refroidissement de l'air
- Eclairage LED d'efficacité moyenne, intensité et durée d'éclairage non optimisées
- Patinoire fermée le mois de juillet

Pour le cas optimisé, les changements suivants ont été considérés :

- Fluide principal : Ammoniac
- Production de 100% de l'ECS et de l'eau de surfaçage par la récupération de chaleur
- Puits de fonte de glace utilisé pour le sous-refroidissement de 15 K de l'ammoniac en sortie de condenseur
- Déshumidification de la patinoire par déshumidificateur dessicant hors période de matchs
- Éclairage LED haute efficacité, intensité et durée d'éclairage réduite au minimum acceptable

Il s'agit d'un cas de référence où des mesures d'efficacité énergétique, particulièrement au niveau des optimisations « faciles », comme installer une pompe de circulation efficace pour le fluide secondaire, sont déjà mises en place. En effet, exploiter une patinoire sans aucune optimisation énergétique en 2024 semble peu crédible. Dans le cadre de cette estimation de potentiel, seules les optimisations plus compliquées et/ou coûteuses à mettre en place, comme le remplacement des machines frigorifiques, sont considérées comme encore manquantes pour le cas de référence.

Tableau 12: Consommations électriques d'une patinoire de référence et optimisée (Berne - plateau Suisse)

Poste de consommation	Berne (référence)	Berne (optimisé) [MWh/an]
<b>Machines frigorifiques</b>	922	657
<b>Pompes</b>	72	72
<b>ECS et surfaçage</b>	144	0
<b>Ventilation</b>	239	239
<b>Déshumidification</b>	24	4
<b>Eclairage</b>	286	86
<b>Total</b>	<b>1687</b>	<b>1058</b>

Les résultats montrent que les deux principaux postes d'économies sont l'éclairage et les machines frigorifiques, par le choix du fluide principal. L'utilisation d'un fluide principal ayant de bonnes performances pour la production du froid est important. Toutefois, l'adéquation du fluide choisi non seulement avec la demande de froid mais également avec la demande de chaleur permet de réaliser des économies substantielles. Le passage du R404a à l'ammoniac permet d'économiser 265 MWh/an électriques par an en raison de ces meilleures performances pour la production de froid. De plus, en raison de rejets de chaleur plus adaptés à

la demande de la patinoire, il permet également d'économiser 144 MWh/an électriques pour la production d'ECS, soit 50% supplémentaires par rapport aux gains du point de vue du froid uniquement, ce qui souligne l'importance de considérer les demandes énergétiques dans leur ensemble plutôt qu'individuellement.

Au niveau de l'éclairage, l'utilisation de lampes LED haute efficacité permet d'économiser 107 MWh/an, sur un potentiel total de 200 MWh/an. Cela montre deux choses : Premièrement, la qualité de l'éclairage LED est très importante, et tous les éclairages LED ne sont pas égaux. Là où dans le discours public, les LED sont présentées comme l'éclairage idéal comparé aux ampoules halogènes et incandescentes, dans le cas d'une patinoire disposant d'un éclairage important, il convient de s'intéresser plus en détails à la qualité des éclairages LED. Deuxièmement, les habitudes et la programmation de l'éclairage dans les locaux peuvent également réduire ou augmenter de plus ou moins de 100 MWh/an pour le scénario considéré, la consommation électrique des éclairages.

Finalement, l'optimisation de la ventilation, non calculée dans le présent rapport, pourrait aussi amener des économies substantielles. Pour cela, il pourrait être envisageable de réduire les débits d'air autant que possible pour diminuer les consommations électriques des ventilateurs. L'introduction d'un concept de ventilation intelligente en fonction de l'occupation des pièces, par exemple à l'aide de capteurs de qualité de l'air, pourrait également être intéressant. Et bien évidemment, l'utilisation d'entraînement et de ventilateurs à haute efficacité est a priori facile à mettre en place.

D'un point de vue plus général, au niveau de la durabilité, l'utilisation de matériaux à faible impact environnemental permet de réduire le bilan carbone d'une patinoire. Toutefois, un écobilan plus poussé, idéalement sur un cas concret, permettrait de mieux quantifier les impacts en phase de construction et d'exploitation. Par exemple, est-ce que le remplacement des isolants synthétiques par des isolants biosourcés est réellement intéressant du point de vue de la durabilité ? Cela dépend de l'impact supplémentaire généré par les demandes en chaud et en froid que ce changement implique. C'est une question pour laquelle une étude plus approfondie sur un cas plus concret permettrait d'apporter une réponse fondée.

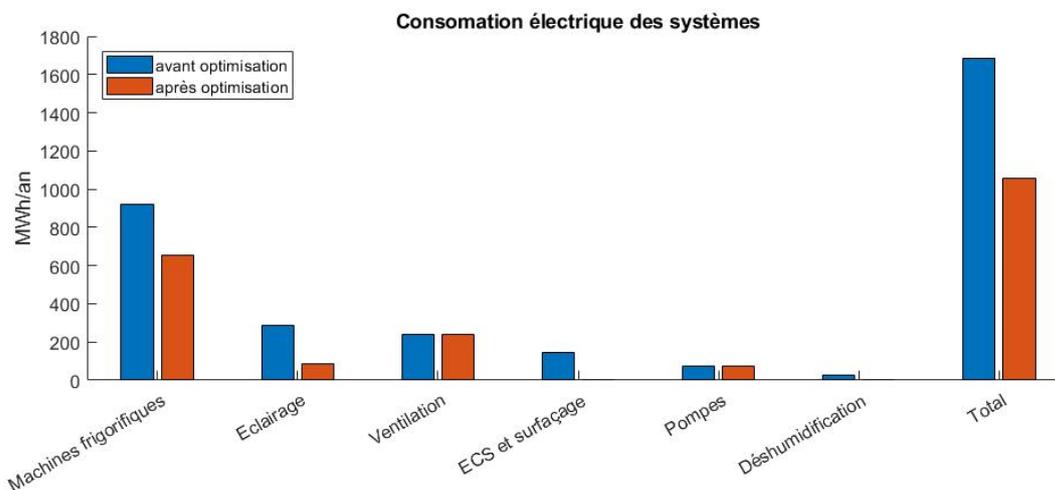


Figure 33: Consommations électriques par système d'une patinoire de référence et optimisée (Berne - plateau Suisse)

Le potentiel d'économie pour l'ensemble des optimisations considérées est de 661 MWh/an, ce qui représente 40% d'une consommation électrique initiale de 1687 MWh/an, pour arriver à une consommation électrique finale de 1026 MWh/an. Les consommations électriques initiales et finales sont nettement plus élevées que les cas étudiés par l'IIFH en Suède (Figure 10), qui indique un potentiel de réduction de 1000 MWh/an à 460 MWh/an. La différence principale entre cette étude et celle de l'IIFH est dans le type de patinoires considérées. Dans le cas de cette étude, il s'agit de grandes patinoires capables d'accueillir des matchs de ligue nationale. De fait, elles disposent de plus d'infrastructures annexes (restaurants, etc.), ce qui explique des consommations initiales et finales plus élevées. Le potentiel d'optimisation déterminé dans cette étude est également supérieur (661 MWh/an) à celui obtenu en Suède (560 MWh/an). Deux explications plausibles pour cette différence sont les potentiels de réductions supérieurs sur l'éclairage, puisque les grandes patinoires disposent de plus de surface à éclairer, ainsi que des hypothèses dans l'état initial peut-être ponctuellement trop pessimistes en raison du manque de données de monitoring précises.

## 4.4 Synergies

Comme l'a montré le bilan des flux d'énergie thermique en jeu dans une patinoire au chapitre 4.2, après avoir réutiliser le maximum des rejets de chaleur des machines frigorifiques pour la ventilation, le chauffage, la production d'ECS et l'entretien de la glace, une patinoire a encore environ 1800 MWh/an de chaleur à 32°C. Il existe deux applications courantes pouvant utiliser cette chaleur : Premièrement, les piscines, pour l'apport énergétique nécessaire au chauffage des bassins entre 25°C et 35°C. De faite, cela fait du sens d'installer patinoires et piscines sur un même site afin de profiter de cette synergie. La Vaudoise Arena est un bon exemple d'implantation de 2 patinoires intérieures, une patinoire extérieure et trois bassins de piscine. Dans ces cas-là, les optimisations qui étaient idéales pour une patinoire isolée ne le sont peut-être plus nécessairement à l'échelle d'un grand centre sportif. Une grande piscine pourrait avoir un besoin suffisant en ECS, à basse température, pour motiver de passer de l'ammoniac au CO<sub>2</sub>.

La deuxième principale utilité pour une grande quantité de chaleur autour des 30°C provenant de patinoire sont les réseaux d'anergie. En supposant un COP de 5 pour la production d'ECS à partir d'un réseau d'anergie à 30°C, une patinoire fournissant 1800 MWh/an à un tel réseau permettrait de couvrir les besoins en ECS annuel d'environ 2000 personnes. Ceci est particulièrement intéressant étant donné que les sources de chaleur de qualité pour les pompes à chaleur en ville peuvent être limitées, puisque les sondes géothermiques se heurtent aux problèmes d'une trop grande densité de puissance nécessaire ainsi qu'un sous-sol souvent très encombré. Le seul bémol à cette application est que les patinoires auront tendance à rejeter plus de chaleur dans un réseau d'anergie en été, lorsque ces besoins de chauffage sont minimaux. Le réseau d'anergie devra donc disposer de sources de chaleur alternatives en hiver lorsque la demande des bâtiments y étant connectés est maximale et l'injection de chaleur de la patinoire minimale.

Finalement, une autre possibilité de valoriser les grands bâtiments comme les patinoires est d'y installer des centrales de production photovoltaïques sur leur toit. Des installations de l'ordre de 4'000 m<sup>2</sup> à 6000 m<sup>2</sup> semble réaliste, cela représente environ 70% de la surface en toiture de la Vaudoise Arena. Cela permet de mettre en place une installation d'une puissance de 700 kWc à 1100 kWc. L'ordre de grandeur de la production d'électricité PV d'une telle installation est de 600 MWh à 1300 MWh, selon l'orientation de la toiture, l'emplacement géographique, les ombrages portés, la qualité des modules PV et autres divers facteurs. Un tel potentiel permet d'atteindre un bilan annuel de production et consommation électrique à l'équilibre pour une patinoire optimisée. Il ne serait par contre pas nécessairement facile d'optimiser la patinoire à la fois du point de vue de la valorisation des rejets thermiques des machines frigorifiques et de l'autoconsommation du PV. En effet, les besoins en électricité d'une patinoire optimisée proviennent principalement des machines frigorifiques qui doivent tourner à puissance (presque) constante de jour comme de nuit. Les autres besoins, comme l'éclairage et la ventilation, n'ont pas non plus réellement de flexibilité sur leurs horaires.

## 5 Conclusions

Les conclusions et perspectives qui peuvent être tirées suite à la réalisation de cette pré-étude sont les suivantes :

- 1) Les consommations énergétiques des patinoires artificielles suisses sont très mal connues. Cette réalité se manifeste par l'absence quasi-totale de mesures qui vont au-delà de ce qui est nécessaire au niveau de la facturation des énergies. Par exemple, les consommations électriques sont rarement désagrégées à une granularité temporelle suffisante et par type de consommations (e.g. éclairage, machines de froid, etc.). De même, les consommations des activités annexes sont souvent comptées simultanément, par exemple les restaurants ou les salles de fitness. Ainsi, il n'est pas possible d'obtenir un diagnostic énergétique précis et, pour les patinoires existantes, d'identifier les possibles points d'amélioration. La même conclusion s'applique aux différentes consommations d'eau.
  - a. *Recommandation 1 : il serait important de mettre en place une stratégie de monitoring des besoins énergétiques des patinoires existantes et futures.*
  - b. *Recommandation 2 : pour limiter les coûts liés à l'installation de compteurs à des endroits-clé des patinoires, une méthodologie précise et répliquable pourrait être développée sur la base de quelques cas-test.*
- 2) La situation météorologique locale joue un rôle prépondérant dans l'équilibre entre les besoins de chaleur et les besoins de froid. Ces particularités doivent être prises en compte de manière détaillée afin de pouvoir dimensionner de manière correcte non seulement les équipements liés à la glace, mais aussi ceux voués au confort des spectateurs(-trices) et des utilisateurs(-trices).
  - c. *Recommandation 3 : les sites des patinoires devraient bénéficier de mesures d'ensoleillement et météorologiques précises avant tout projet de rénovation/construction.*
- 3) Si possible, les patinoires devraient être couplées à des installations extérieures, comme des piscines ou des réseaux de chauffage à distance, afin de pouvoir profiter des synergies permettant, par exemple, de valoriser des rejets de chaleur à différents niveaux de température.
  - d. *Recommandation 4 : les nouvelles constructions ou rénovations de patinoires devraient systématiquement inclure une étude holistique incluant des possibles synergies avec les infrastructures et territoires environnants. L'exemple de la future rénovation de la Patinoire des Mélèzes (La Chaux-de-Fonds, NE) qui devrait inclure une véritable centrale énergétique de quartier est instructif. Pour les patinoires artificielles isolées, l'absence de synergies potentielles doit être considérée dans le dimensionnement global.*
- 4) Les concepts de génie civil ont une importance fondamentale afin de réaliser une patinoire à basse consommation énergétique (et donc bas carbone). La cohabitation entre secteurs froids, tempérés et chauffés doit être étudiée de manière attentive afin d'éviter des « conflits ».
  - e. *Recommandation 5 : viser l'utilisation de matériaux biosourcés pour la construction et l'isolation, ainsi que de béton projeté aux endroits où cela est possible.*
  - f. *Recommandation 6 : réfléchir à la proximité de zones chaudes et froides, en établissant la dalle refroidie aussi bas que possible et en situant les diverses zones en fonction de leurs températures au sein des étages supérieurs. Pas de parkings en sous-sol.*
- 5) Le choix des machines de froid, ainsi que des fluides de travail associés, ainsi que des installations de déshumidification est crucial. Il doit se réaliser en fonction des besoins spécifiques et des indications météorologiques précises mentionnées ci-haut.
  - g. *Recommandation 7 : favoriser l'utilisation d'ammoniac et de CO<sub>2</sub> comme fluides de travail des machines frigorifiques.*

# Annexes

Composition plancher intérieur :

Matériaux	épaisseur (cm)	conductivité thermique (W/m.k)	densité (kg/m <sup>3</sup> )	Capacité thermique massique (J/(kg.K))
faux plafond	1,25	0,25	800	799,2
EPS	20	0,031	16	1404
béton projeté	20	1,6	2200	1000,8

Composition mur de l'enceinte de la patinoire :

Matériaux	épaisseur (cm)	conductivité thermique (W/m.k)	densité (kg/m <sup>3</sup> )	Capacité thermique massique (J/(kg.K))
enduit	1,25	0,57	1300	1000,8
EPS	20	0,031	16	1404
béton projeté	20	1,6	2200	1000,8

Composition des murs intérieurs séparant les pièces :

Matériaux	épaisseur (cm)	conductivité thermique (W/m.k)	densité (kg/m <sup>3</sup> )	Capacité thermique massique (J/(kg.K))
plaque de plâtre	1,25	0,21	850	799,2
EPS	20	0,031	16	1404
béton projeté	20	1,6	2200	1000,8
plaque de plâtre	1,25	0,21	850	799,2

Composition du plancher bas :

Matériaux	épaisseur (cm)	conductivité thermique (W/m.k)	densité (kg/m <sup>3</sup> )	Capacité thermique massique (J/(kg.K))
<b>plaque de plâtre</b>	1,25	0,21	850	799,2
<b>XPS</b>	30	0,035	30	1400,4
<b>béton projeté</b>	20	1,6	2200	1000,8
<b>béton ciré</b>	0,8	1,6	2200	1000,8

Composition de la toiture :

Matériaux	épaisseur (cm)	conductivité thermique (W/m.k)	densité (kg/m <sup>3</sup> )	Capacité thermique massique (J/(kg.K))
<b>faux plafond</b>	1	0,25	800	799,2
<b>air</b>	20	0,17	1,3	1256
<b>béton projeté</b>	20	1,6	2200	1000,8
<b>EPS</b>	20	0,031	16	1404

Composition des murs extérieurs :

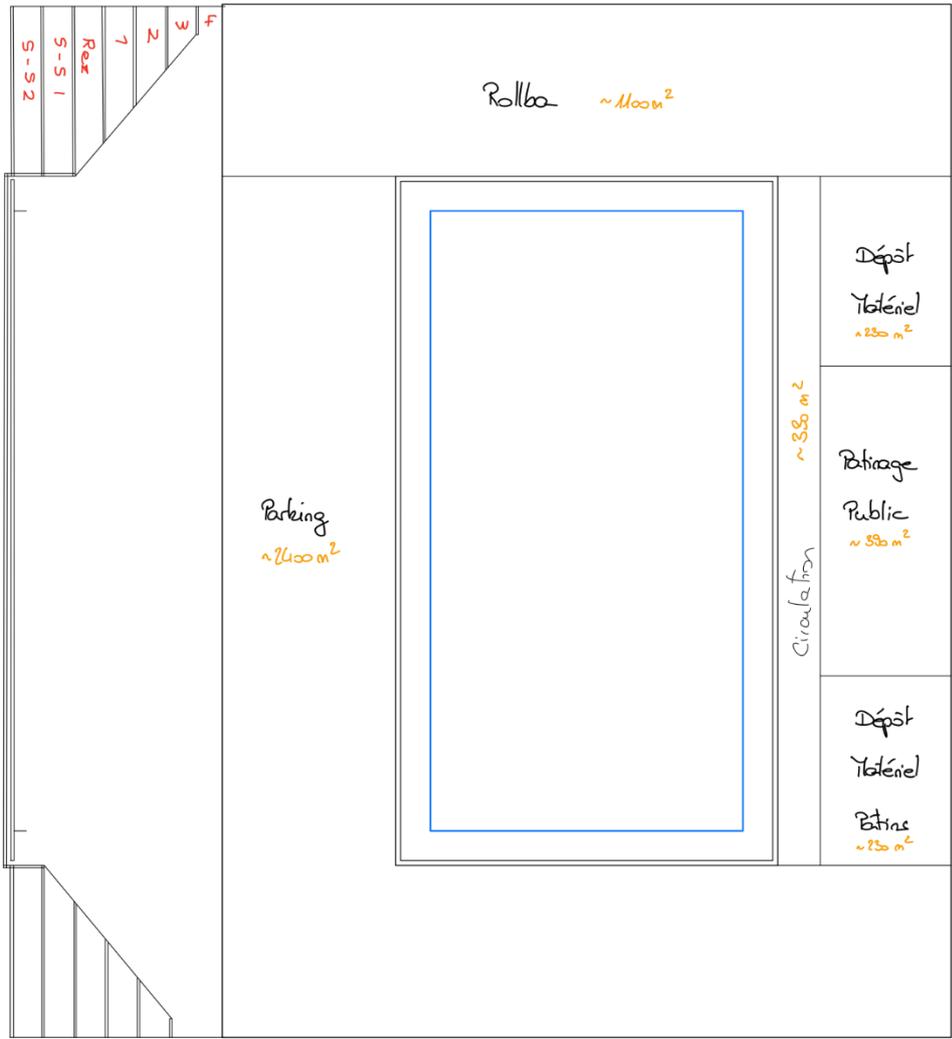
Matériaux	épaisseur (cm)	conductivité thermique (W/m.k)	densité (kg/m <sup>3</sup> )	Capacité thermique massique (J/(kg.K))
<b>enduit (plâtre)</b>	1	0,57	1300	1000,8
<b>béton projeté</b>	20	1,6	2200	1000,8
<b>EPS</b>	20	0,031	16	1404
<b>pare-pluie</b>	3	0,043	185	2098,8
<b>enduit ext chaux</b>	2	0,8	1600	1000,8

Tableau 13: Débit d'air nominal et régulation par pièce

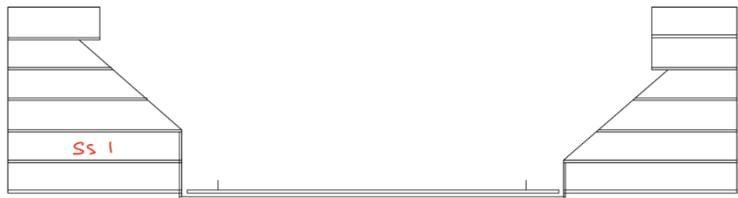
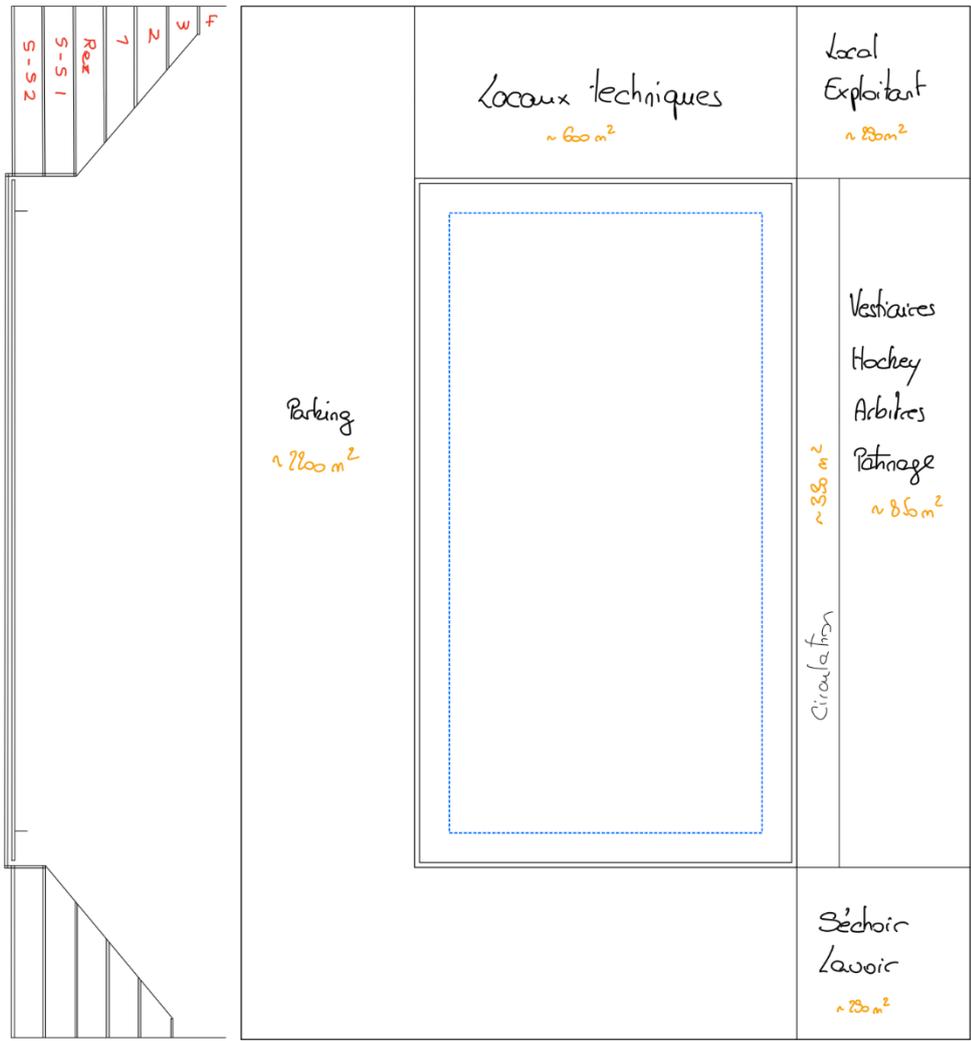
Nom du local	Clef de dimensionnement	Type de zone	Profil de ventilation	Débit d'aire nominal [m <sup>3</sup> /h]
Dépôt matériel	400 m <sup>2</sup>	Tempérée	Général	100
Locaux techniques	420 m <sup>2</sup>	Tempérée	Général	100
Lavoir / Sechoir	Equipement de 50 p. à sécher	Tempérée	Général	2500
Location de patins	Patins de 50 p. à de sécher	Tempérée	Général	2500
Entrée des sportifs	10 personnes	Tempérée	Match	360
Entrée principale	50 personnes	Tempérée	Général	1800
Vestiaires public	50 personnes	Tempéré	Général	2500
Vestiaire arbitre	10 personnes	Chauffée	Allégé	500
Vestiaires patinage	20 personnes	Chauffée	Allégé	1000
Vestiaire hockey sur glace	20 personnes	Chauffée	Allégé	1000
Infirmierie	10 personnes	Chauffée	Général	360
Salle de fitness	30 personnes	Chauffée	Général	360
Caisses	100 personnes	Chauffée	Général	3600
Bureaux et administration	30 personnes	Chauffée	Général	1080
Restaurant	400 personnes	Chauffée	Général	14400
Cuisine	30 places de travail	Chauffée	Général	1500
Buvette 1	250 personnes	Chauffée	Général	9000
WC 1	20 personnes	Chauffée	Général	300
Buvette 2	250 personnes	Chauffée	Général	9000
WC 2	20 personnes	Chauffée	Match	300
Buvette 3	250 personnes	Chauffée	Match	9000
WC 3	20 personnes	Chauffée	Match	300
Buvette 4	250 personnes	Chauffée	Match	9000
WC 4	20 personnes	Chauffée	Match	300
Zone VIP 1	50 personnes	Chauffée	Match	1800
Zone VIP 2	50 personnes	Chauffée	Match	1800
Salle de presse et conférences	240 personnes	Chauffée	Match	8640
Salle multimedia	50 personnes	Chauffée	Match	1800
Patinoire (glace)	8000 personnes	Chauffée	Patinoire	160000

Sous-sol 2

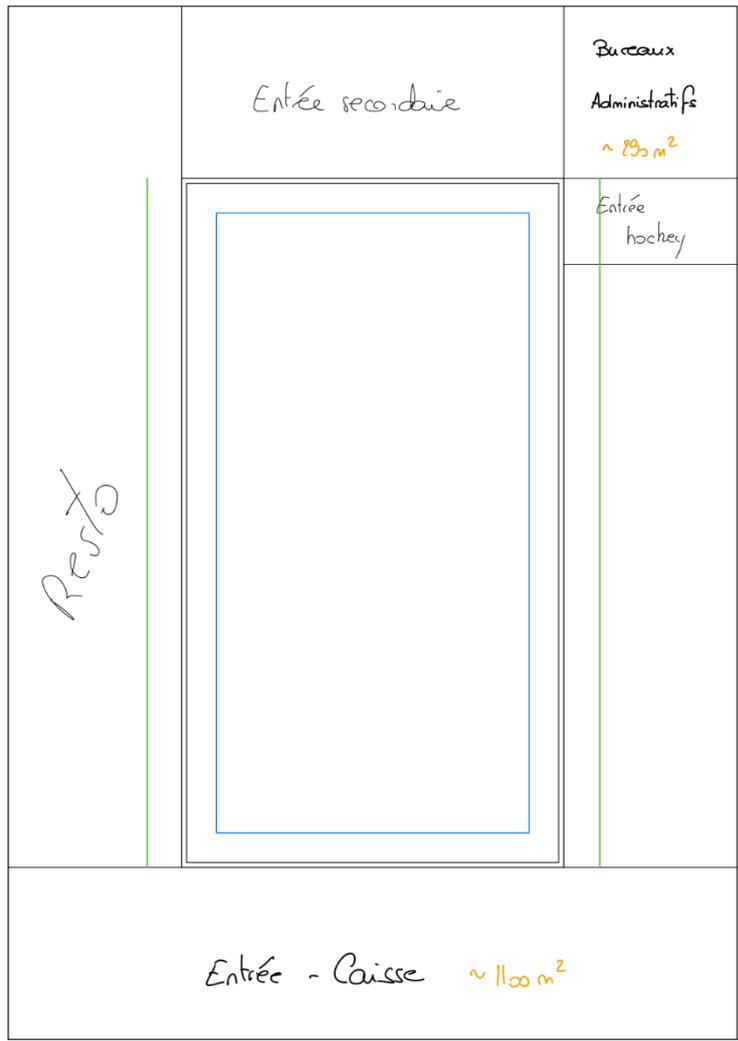
6 carrés = 30 m  
3 carrés = 15 m  
1 carré = 5 m



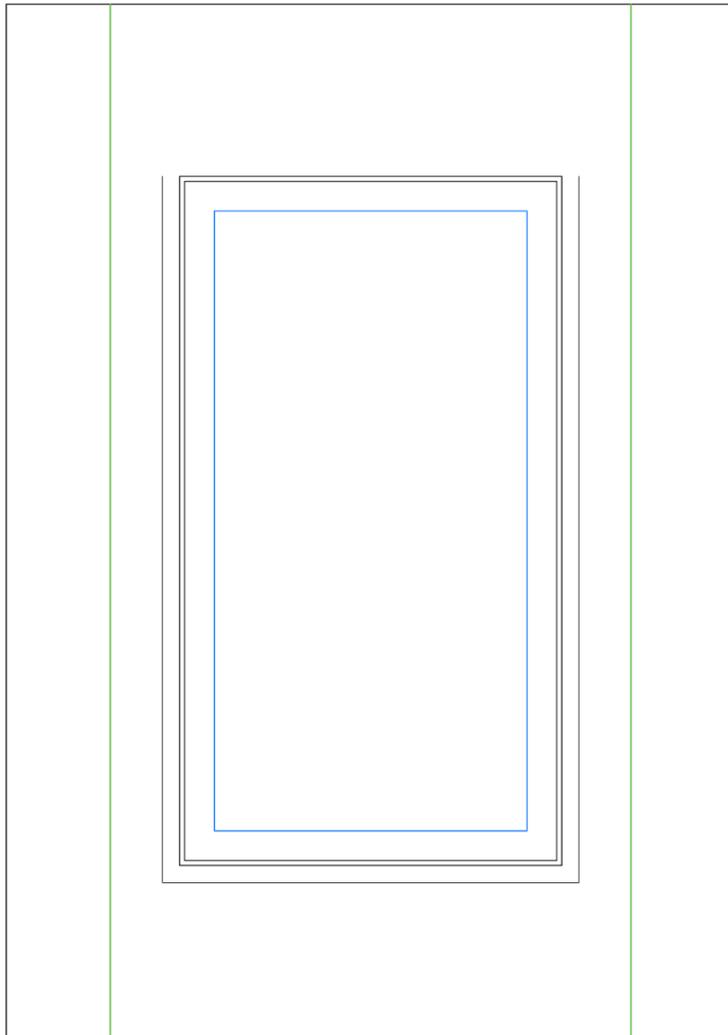
Sous-sol 1



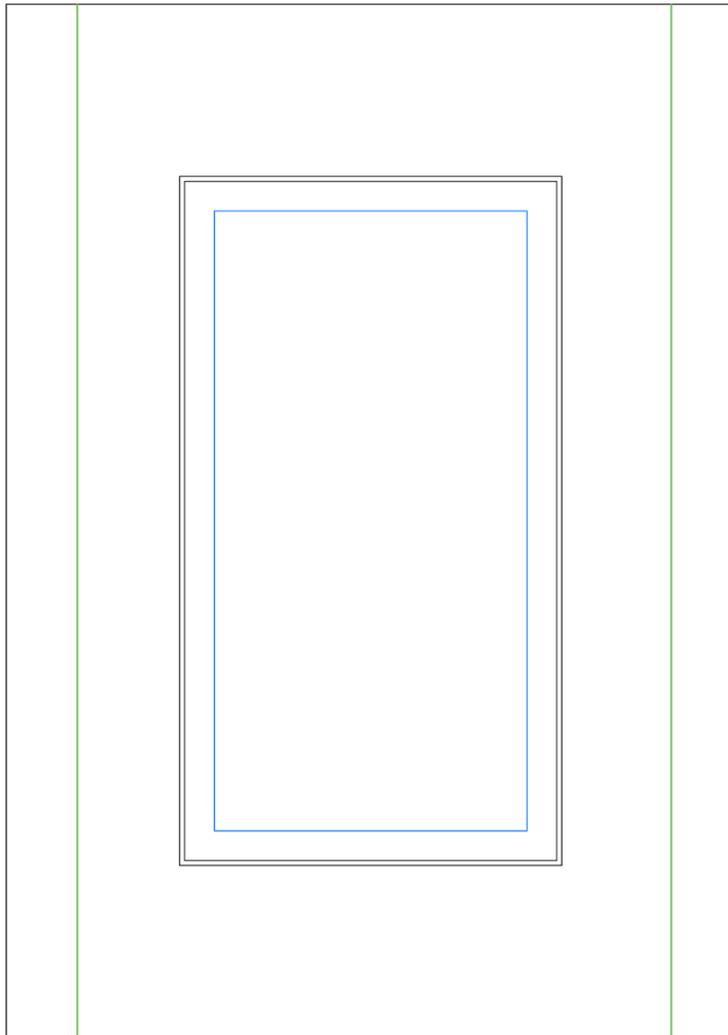
Rez



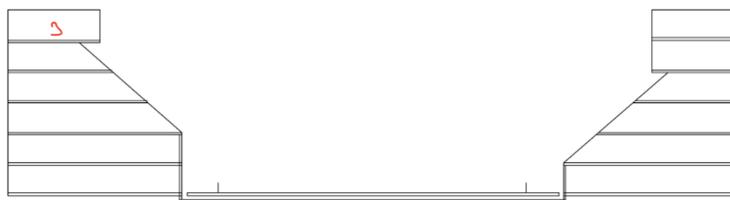
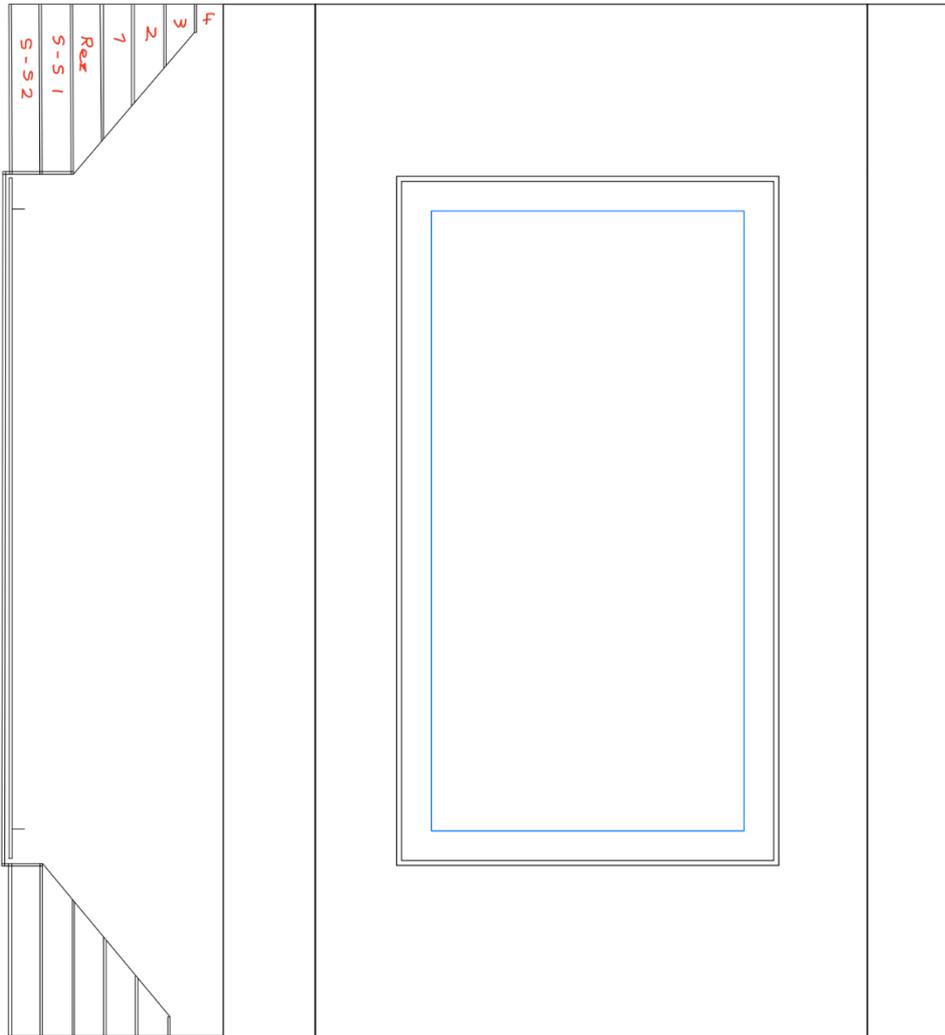
1



2



3



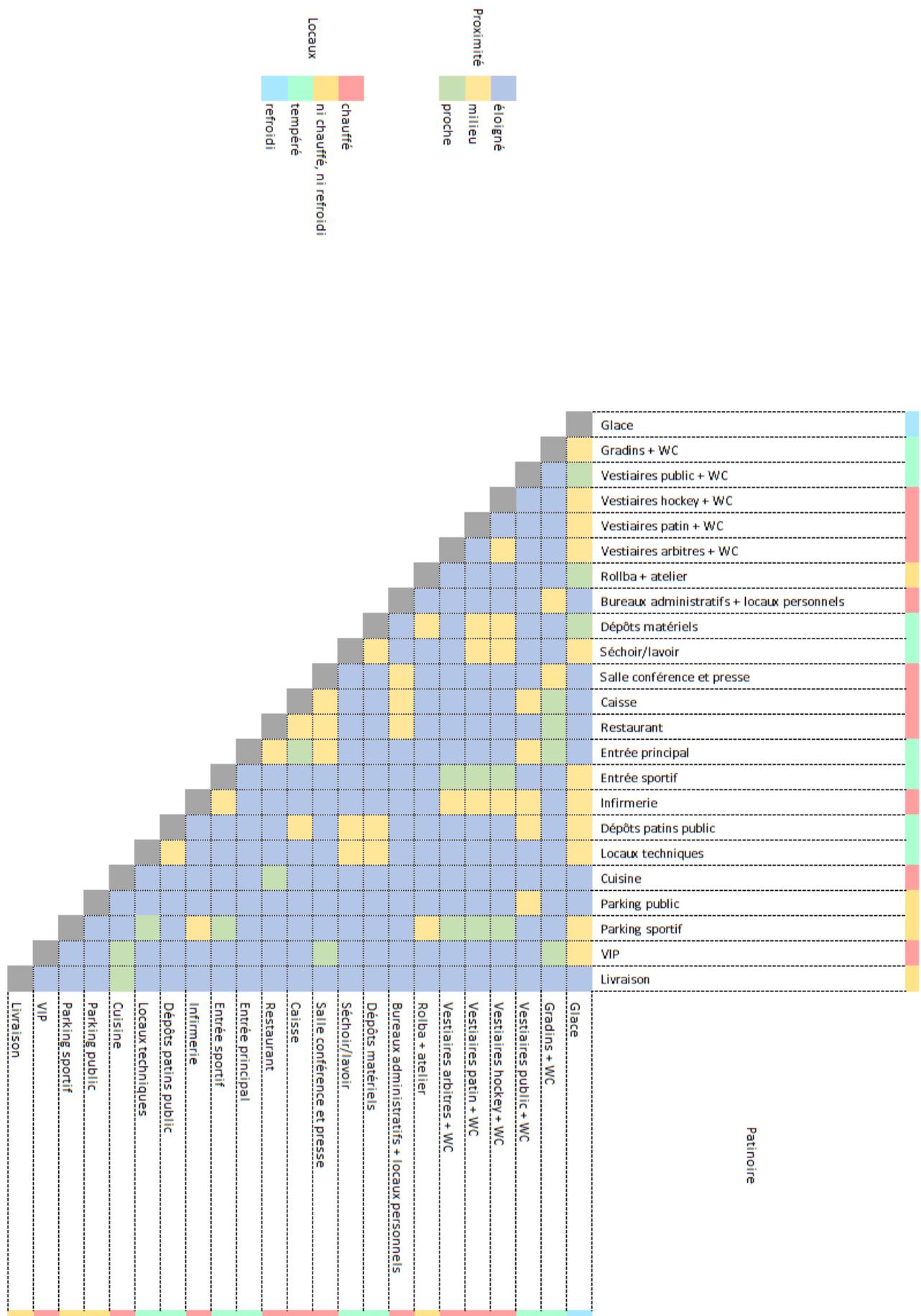


Figure 34: Matrice de proximité horizontale

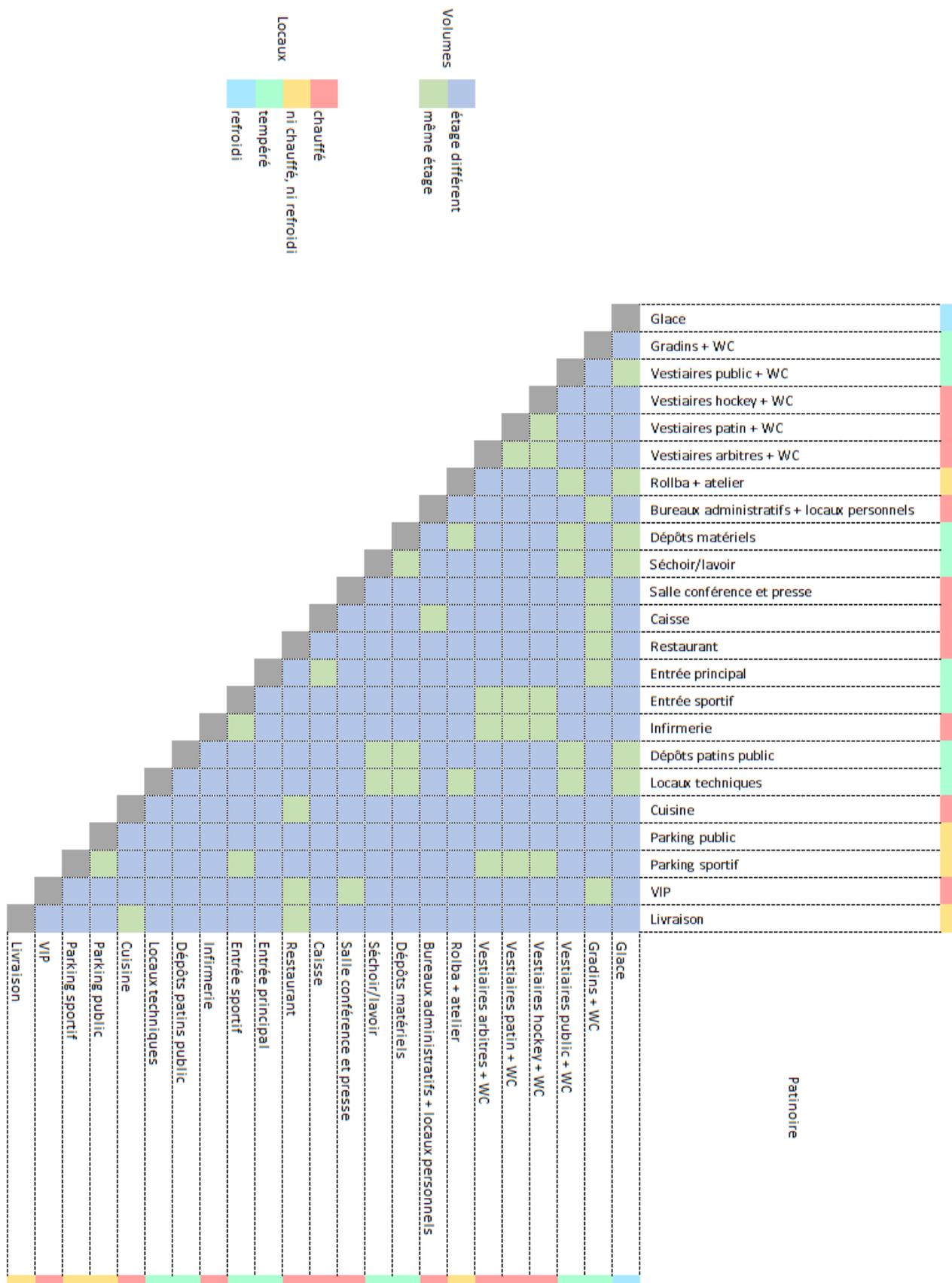


Figure 35: Matrice de proximité verticale