

# Ventilation du Vélo Tunnel Québec

Dimensionnement, fonctionnement, qualité de l'air et coûts d'un réseau cyclable souterrain de 150 km

Par **Philippe Leblond**

Document de travail — ordres de grandeur d'ingénierie préliminaire · Juin 2026

## L'ESSENTIEL

Un tunnel à **vélos** est l'un des tunnels les plus faciles à ventiler : **aucun gaz d'échappement** à évacuer. La qualité de l'air au quotidien (CO<sub>2</sub>, chaleur, humidité) est triviale.

- **CO<sub>2</sub>** : ~645 ppm à la pointe, loin du seuil de confort (1 000 ppm) et du seuil de sécurité (5 000 ppm).
- **Confort** : ~17 °C et 55–60 % d'humidité, le sol à 8–10 °C climatise gratuitement l'été.
- **Bruit** : 60–65 dB(A) avec des ventilateurs silencieux.
- **Le vrai défi** : la fumée d'un feu de batterie lithium — c'est elle qui dimensionne les ventilateurs, pas le CO<sub>2</sub>.
- **Coûts** : ~600 M\$ à la construction (compris dans les 8,7 G\$) et ~3–4,5 M\$/an d'électricité.

## Sommaire

- 1 Résumé exécutif
- 2 Pourquoi un tunnel à vélos est facile à ventiler
- 3 Principe de fonctionnement
- 4 Hypothèses et données de base
- 5 Charge à dimensionner pour 100 000 usagers
- 6 Qualité de l'air — gaz carbonique (CO<sub>2</sub>)
- 7 Chaleur et rôle du sol
- 8 Humidité et condensation

- 9** Bruit
- 10** Sécurité incendie : la fumée, vrai facteur dimensionnant
- 11** Coût d'investissement
- 12** Coût d'exploitation
- 13** Analyse de sensibilité et robustesse
- 14** Synthèse
- 15** Limites et étude détaillée à mener
- 16** Annexe : formules et facteurs utilisés

# 1 Résumé exécutif

---

La ventilation d'un tunnel routier sert avant tout à évacuer les gaz d'échappement des véhicules et à maîtriser la fumée d'un incendie de voiture ou de camion. Le Vélo Tunnel Québec n'a ni l'un ni l'autre : il n'y circule aucun moteur à combustion. Les seules charges internes à traiter sont le gaz carbonique, la chaleur et la vapeur d'eau dégagés par les cyclistes — un problème de l'ordre d'un gymnase bondé, non d'une autoroute souterraine.

La présente analyse établit, par le calcul, que la qualité de l'air au quotidien est aisée à garantir : une brise longitudinale de 1,5 m/s maintient le CO<sub>2</sub> autour de 645 ppm même à l'heure de pointe, et la température reste confortable grâce à la fraîcheur naturelle du sol à dix mètres de profondeur. Le facteur qui dimensionne réellement le système n'est pas l'air courant, mais le **désenfumage** en cas d'incendie de batterie au lithium. Le coût d'investissement, estimé à environ 600 M\$, est réaliste, dominé par les puits de ventilation en surface ; le coût d'exploitation (~3 à 4,5 M\$/an d'électricité) est mineur grâce à l'hydroélectricité.

## 2 Pourquoi un tunnel à vélos est facile à ventiler

---

Dans un tunnel d'autoroute, 80 à 90 % de la puissance de ventilation sert à diluer le monoxyde de carbone, les oxydes d'azote et les particules des véhicules, et à évacuer la fumée d'un feu pouvant atteindre 5 à 100 MW de puissance thermique. Tout ce poste disparaît ici.

Les seules charges internes d'un tunnel à vélos sont :

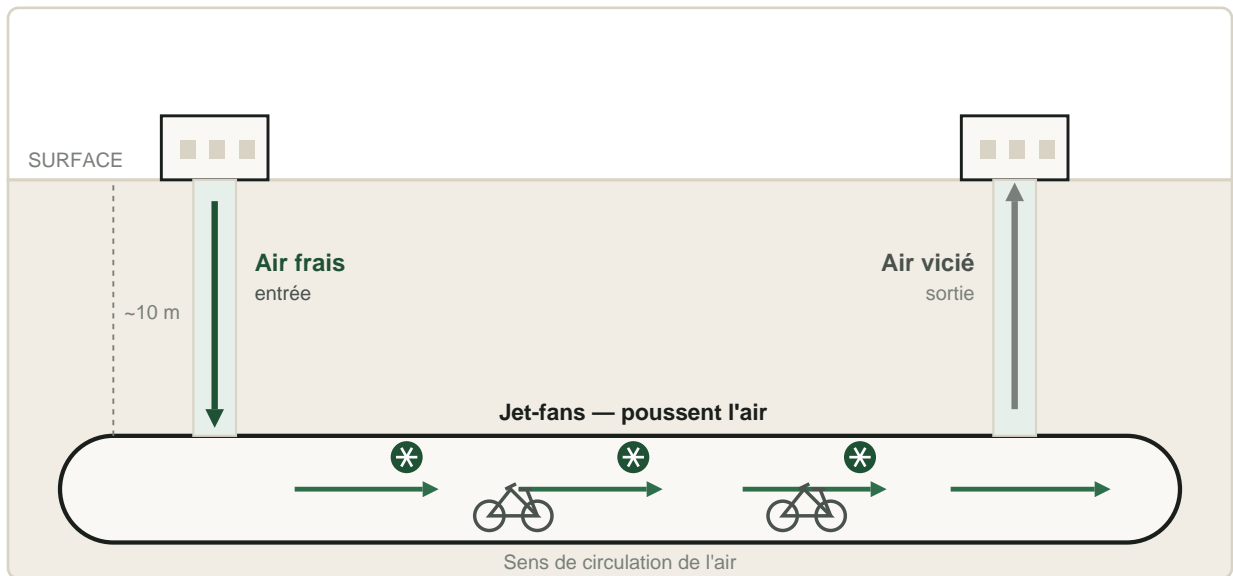
- le **gaz carbonique (CO<sub>2</sub>)** expiré par les cyclistes ;
- la **chaleur** de leur métabolisme et des moteurs de vélos électriques ;
- la **vapeur d'eau** (respiration et sueur).

Ces trois charges sont faibles et se diluent facilement. C'est ce qui rend les chiffres présentés dans ce document aussi confortables — et c'est un avantage structurel du concept, pas un optimisme de circonstance.

## 3 Principe de fonctionnement

---

Le système repose sur la **ventilation longitudinale par ventilateurs accélérateurs (jet-fans)**, la technologie standard et la moins coûteuse des longs tunnels. Des jet-fans fixés à la voûte poussent l'air dans le sens du tunnel, comme une chaîne de petits coups de vent. L'air frais entre par des puits de surface, parcourt le tunnel en se chargeant lentement de CO<sub>2</sub> et de chaleur, puis ressort par d'autres puits.



*L'air frais descend par des puits de surface, les jet-fans le poussent le long du tunnel, et l'air vicié ressort par d'autres puits.*

## Architecture retenue

Élément	Rôle	Implantation
Jet-fans silencieux	Maintiennent le flux d'air longitudinal	~ tous les 250 m
Puits d'apport / rejet	Air frais entrant, air vicié sortant, extraction de fumée	~ tous les 2 km, souvent aux stations
Capteurs de qualité d'air	CO <sub>2</sub> , CO, particules, température, humidité, vitesse d'air	tous les 200 m
Centre de contrôle + automate	Module la vitesse des ventilateurs selon l'affluence	central, 24/7
Sas anti-fumée	Compartimentent en cas d'incendie	tous les 500 à 1000 m

## La clé économique : la modulation

La nuit, avec presque personne dans les tunnels, le CO<sub>2</sub> et la chaleur sont négligeables : les ventilateurs tournent au ralenti ou s'arrêtent. Aux heures de pointe, les capteurs les font monter en régime. C'est cette modulation pilotée par capteurs qui maintient la facture d'électricité basse (section 12).

## 4 Hypothèses et données de base

Tous les calculs qui suivent reposent sur les valeurs ci-dessous. Les valeurs par cycliste sont volontairement prudentes : un vélo électrique en assistance produit en réalité moins de CO<sub>2</sub> qu'indiqué.

Paramètre	Valeur retenue	Note
Diamètre du tunnel	3,6 m	standard Prufrock
Section libre pour l'air	~ 7 m <sup>2</sup>	au-dessus de la chaussée (calcul géométrique)
Longueur du réseau	150 km	—

Paramètre	Valeur retenue	Note
Température du roc à 10 m	8 à 10 °C	stable toute l'année (avantage majeur)
CO <sub>2</sub> par cycliste	1,5 L/min = 0,09 m <sup>3</sup> /h	prudent (vélo électrique : ~1,0–1,2)
Chaleur par cycliste	~ 450 W	métabolisme + moteur + frottements
Vapeur d'eau par cycliste	~ 400 g/h	respiration + sueur, ambiance fraîche
Vitesse d'air, régime normal	1,5 m/s	brise à peine perceptible
Vitesse d'air, urgence fumée	~ 2,5 m/s	vitesse critique de désenfumage

Repère utile : un cycliste roulant à 22 km/h subit déjà son propre vent de face de 6,1 m/s. Une brise ambiante de 1,5 m/s est donc marginale pour lui.

## 5 Charge à dimensionner pour 100 000 usagers

L'erreur classique consiste à calculer pour 100 000 personnes présentes *en même temps*. En réalité, ce qui compte est le nombre présent **simultanément dans les tunnels à l'heure de pointe**, bien plus faible puisque les usagers ne font que passer.

100 000 usagers/jour x 2 trajets (aller-retour) = 200 000 trajets/jour  
 Facteur d'heure de pointe (~9 % des trajets) = 18 000 trajets/h de pointe  
 Temps moyen dans le tunnel : 8 km / 22 km/h = 0,36 h ~ 22 minutes  
 Présents simultanément = 18 000 x 0,36 ~ 6 500 cyclistes

On retient **~7 000 cyclistes simultanés** à la pointe (valeur de conception, légèrement prudente), répartis sur 150 km, soit une densité de **~47 cyclistes/km** — un cycliste tous les ~21 m, toutes directions confondues. Pour une infrastructure cyclable à l'heure de pointe, c'est un flux soutenu mais fluide. À pleine maturité (les 200 000 usagers visés par le projet), on monterait à ~13 000–14 000 simultanés — cas traité à la section 13.

Le réseau étant ventilé par **tronçons**, on raisonne sur un tronçon représentatif de 2 km entre deux puits, contenant à la pointe  $47 \times 2 = 94$  **cyclistes**.

## 6 Qualité de l'air — gaz carbonique (CO<sub>2</sub>)

CO<sub>2</sub> produit dans un tronçon de 2 km à la pointe :

$94 \text{ cyclistes} \times 0,09 \text{ m}^3/\text{h} = 8,5 \text{ m}^3/\text{h}$  de CO<sub>2</sub>

Débit d'air longitudinal à 1,5 m/s :

$7 \text{ m}^2 \times 1,5 \text{ m/s} \times 3\,600 = 37\,800 \text{ m}^3/\text{h}$  d'air

Hausse de concentration de CO<sub>2</sub> d'un bout à l'autre du tronçon :

$8,5 / 37\,800 = 0,000225 = 225 \text{ ppm}$

L'air entre à ~420 ppm (extérieur) et ressort à **~645 ppm**. La comparaison aux seuils de référence est sans appel :

Repère de CO <sub>2</sub>	Concentration
Air extérieur (entrée)	~420 ppm
<b>Notre tunnel à l'heure de pointe</b>	<b>~645 ppm</b>
Seuil de confort intérieur	1 000 ppm
Espace transitoire acceptable	1 500 ppm
Limite santé-sécurité (exposition 8 h)	5 000 ppm

## Test de stress

Si l'on double la densité et que tout le monde pédale fort à 2 L/min (0,12 m<sup>3</sup>/h) :

$$188 \text{ cyclistes} \times 0,12 \text{ m}^3/\text{h} = 22,6 \text{ m}^3/\text{h} \text{ de CO}_2$$

$$22,6 / 37\,800 = 598 \text{ ppm} \rightarrow \text{sortie} \sim 1\,020 \text{ ppm}$$

Toujours sous le seuil de confort, et très loin du seuil de sécurité. **Conclusion** : le CO<sub>2</sub> n'est pas un enjeu. Une brise de 1 à 2 m/s suffit dans tous les cas.

## 7 Chaleur et rôle du sol

Chaleur dégagée dans un tronçon de 2 km à la pointe :

$$94 \text{ cyclistes} \times 450 \text{ W} = 42,3 \text{ kW}$$

$$+ \text{éclairage LED} (\sim 9 \text{ kW/km}) = 18 \text{ kW}$$

$$\text{Total} \sim 60 \text{ kW}$$

Capacité de l'air à transporter cette chaleur (débit massique x chaleur massique) :

$$37\,800 \text{ m}^3/\text{h} = 10,5 \text{ m}^3/\text{s} \times 1,2 \text{ kg/m}^3 = 12,6 \text{ kg/s}$$

$$12,6 \text{ kg/s} \times 1\,005 \text{ J/kg.K} = 12,7 \text{ kW par degré C}$$

$$\text{Hausse} = 60 / 12,7 = 4,7 \text{ degrés C sur le tronçon}$$

De l'air entrant à ~12 °C ressortirait donc vers ~17 °C — confortable pour l'effort.

### L'atout décisif : le roc

À dix mètres de profondeur, la roche autour du tunnel est à **8–10 °C toute l'année** en région de Québec. Les parois agissent comme un immense puits de chaleur :

- **Été** : le tunnel est naturellement climatisé. L'air chaud de surface est rafraîchi par le roc — un avantage énorme pendant la canicule en ville.
- **Hiver** : il faut surtout tempérer l'air aux entrées (le budget prévoit déjà le chauffage des entrées), pas dans le tunnel.

**Conclusion** : la chaleur est confortable, et la géothermie passive du sol québécois fait une grande partie du travail gratuitement.

## 8 Humidité et condensation

Vapeur d'eau ajoutée dans un tronçon de 2 km à la pointe :

94 cyclistes x 400 g/h = 37,6 kg/h de vapeur d'eau  
Air : 37 800 m<sup>3</sup>/h x 1,2 kg/m<sup>3</sup> = 45 360 kg/h  
Hausse d'humidité = 37 600 g / 45 360 kg = 0,83 g d'eau / kg d'air

C'est modeste : à 15 °C, passer par exemple de 50 % à ~58 % d'humidité relative. Les cyclistes eux-mêmes ne « noient » pas le tunnel.

## Le vrai enjeu : la condensation estivale

En été, l'air extérieur chaud et humide aspiré dans un tunnel à 10 °C atteint son point de rosée au contact des parois froides, ce qui provoque condensation, sol glissant et risque de moisissure. La parade :

- **drainage et pompage** du tunnel (déjà au budget) ;
- **conditionnement / déshumidification de l'air d'apport** aux puits pendant les pics d'humidité estivale ;
- pente et caniveaux pour évacuer l'eau.

En hiver, l'air extérieur très sec rend au contraire le tunnel agréablement sec. **Conclusion** : l'apport des cyclistes est mineur ; il faut surtout maîtriser la condensation d'été par le drainage et le traitement de l'air d'apport.

## 9 Bruit

Un jet-fan **brut** est bruyant : 85 à 95 dB(A) à 1 m. Tel quel, ce serait inacceptable pour des cyclistes qui passent en dessous. La solution, standard dès qu'il y a des piétons ou cyclistes, est d'utiliser des **ventilateurs à silencieux (atténuateurs)**, combinés à l'absorption acoustique des parois (béton texturé et panneaux de laine de roche déjà prévus).

Environnement	Niveau sonore
Bibliothèque silencieuse	~40 dB(A)
<b>Tunnel, heures creuses (ventilateurs au ralenti)</b>	<b>~55–60 dB(A)</b>
<b>Tunnel, heure de pointe (ventilateurs en régime)</b>	<b>~62–68 dB(A)</b>
Conversation normale	~60 dB(A)
Aspirateur, à 1 m	~70 dB(A)
Seuil de gêne sur exposition prolongée	~70+ dB(A)
Jet-fan SANS silencieux, à 1 m (à éviter)	85–95 dB(A)

Un fond continu de 60–65 dB(A) est non seulement acceptable, il est plutôt agréable : c'est le « ronronnement doux » décrit sur la page Acoustique, un bruit blanc qui masque les bruits parasites et adoucit l'écho. **Point à inscrire à l'appel d'offres** : des jet-fans silencieux, sans quoi on dépasse 85 dB.

## 10 Sécurité incendie : la fumée, vrai facteur dimensionnant

Tout ce qui précède est facile. Le système est en réalité dimensionné par le pire incendie crédible, qui, dans un tunnel à vélos, est un **emballement thermique de batterie lithium-ion** (vélo ou trottinette électrique).

	Feu de batterie lithium	Feu de voiture	Feu de camion
Puissance thermique	dizaines à quelques centaines de kW	5–8 MW	30–100 MW
Fumée	dense, très toxique, rapide	toxique	très toxique
Extinction	difficile, réinflammation	gérable	difficile

La puissance reste très inférieure à celle d'un véhicule, mais la fumée est dense, toxique et arrive vite. La stratégie :

- **Pousser la fumée d'un seul côté** à la vitesse critique (~2,5 m/s) pour garder l'autre côté respirable — les jet-fans déjà installés montent facilement à ce régime.
- **La difficulté réelle est la circulation à double sens** : les usagers en aval de l'incendie se retrouvent dans le panache. D'où l'importance des dispositifs déjà prévus : sorties de secours (200–300 m), niches refuges (100 m), sas anti-fumée (500–1000 m) et pilotage par le centre de contrôle.
- **Extraction de fumée aux puits** (l'aspirer vers la surface) : la solution la plus propre, à mutualiser avec le budget de suppression incendie.

**Conclusion** : maîtrisable avec des méthodes éprouvées, mais c'est LE défi d'ingénierie. C'est la vitesse critique (~2,5 m/s), et non le CO<sub>2</sub>, qui fixe la taille des ventilateurs.

## 11 Coût d'investissement

Reconstruction ascendante du poste « Ventilation et filtration d'air » du budget (600 M\$) :

Composante	Quantité	Coût unitaire	Sous-total
Jet-fans silencieux (installés)	~1 200	~60 000 \$	72 M\$
Puits de surface (apport / rejet / désenfumage)	~75	~5 M\$	375 M\$
Unités de filtration d'air	~40	~1 M\$	40 M\$
Capteurs de qualité d'air	~750	~5 000 \$	3,75 M\$
Automatisme, SCADA, registres, câblage	—	—	~40 M\$
Sous-total ascendant			~531 M\$
Marge interne d'ingénierie			~70 M\$
<b>Total (~ budget projet)</b>			<b>~600 M\$</b>

### Lecture honnête

- Les **jet-fans eux-mêmes sont bon marché** (~72 M\$, soit 12 % du poste). C'est trompeusement rassurant.
- Les **puits de surface dominant** (~375 M\$, soit ~63 %). En milieu urbain dense, un puits avec structure de surface, gros ventilateur axial, acquisition de terrain et permis coûte cher. La colocalisation avec les ~150 stations réduit le coût marginal — c'est l'argument qui rend le 600 M\$ tenable.
- **Risque à la hausse** : un puits tous les 1,5 km (~100 puits) ou un foncier urbain plus cher peut porter le poste à 700–800 M\$. La contingence de projet de 20 % (1,45 G\$) absorbe ce genre d'écart.

**Conclusion** : le 600 M\$ est réaliste mais c'est la ligne la plus optimiste du budget, et son point sensible est le nombre et le coût des puits urbains.

## 12 Coût d'exploitation

Puissance installée des ventilateurs :

Jet-fans : ~1 200 x ~15 kW = ~18 MW  
Puits : ~75 x ~75 kW = ~5,6 MW  
Total : ~22 à 24 MW installés

Facteur de charge réel (modulation) : ~25 à 30 %

-> Puissance moyenne ~5 à 6,6 MW  
-> Énergie annuelle : 44 000 à 58 000 MWh/an

Le budget du projet retient **44 000 MWh/an**, ce qui correspond à une modulation agressive (ventilateurs quasi à l'arrêt la nuit). L'estimation moins optimiste donne ~58 000 MWh/an. La réalité se situe probablement dans cette fourchette. Au tarif d'Hydro-Québec (~7 à 10 cents/kWh pour ce type de grande puissance) :

44 000 à 58 000 MWh x ~0,07 à 0,10 \$/kWh = 3 à 4,5 M\$/an

**Conclusion** : ~3 à 4,5 M\$/an, un poste mineur grâce à l'hydroélectricité. Comme l'énergie ne pèse que ~5 % du budget d'exploitation annuel (174 M\$), même une sous-estimation importante de la consommation de ventilation aurait un effet négligeable sur le total. Le budget n'est pas fragile sur ce point.

## 13 Analyse de sensibilité et robustesse

Que se passe-t-il à pleine maturité, lorsque le réseau atteint les 200 000 usagers visés ? L'occupation simultanée double, à ~13 000–14 000 cyclistes, soit ~93 cyclistes/km et ~186 par tronçon de 2 km. À vitesse d'air inchangée (1,5 m/s) :

186 cyclistes x 0,09 m<sup>3</sup>/h = 16,7 m<sup>3</sup>/h de CO<sub>2</sub>  
16,7 / 37 800 = 442 ppm -> sortie ~ 862 ppm

Toujours sous le seuil de confort de 1 000 ppm, sans même augmenter la ventilation. Et si besoin, porter la brise à 2 m/s ramènerait la hausse sous 330 ppm. Le système absorbe donc le doublement de la fréquentation avec une large marge.

Les véritables leviers d'incertitude ne sont pas la qualité de l'air, mais : (1) le nombre et le coût des puits de ventilation ; (2) la capacité de désenfumage requise par l'étude incendie ; (3) la consommation électrique réelle, dont l'impact budgétaire reste faible grâce au tarif hydroélectrique.

## 14 Synthèse

Aspect	À la pointe (100 000 usagers)	Verdict
CO <sub>2</sub>	~645 ppm (brise de 1,5 m/s)	Non-enjeu. Marge énorme jusqu'à 5 000 ppm.
Chaleur	+4,7 °C/tronçon ; sortie ~17 °C	Confortable, refroidissement gratuit par le roc.
Humidité	+0,8 g/kg (apport cyclistes)	Modeste ; vrai travail = condensation d'été.
Bruit	60–68 dB(A)	Agréable si jet-fans silencieux (à spécifier).

Aspect	À la pointe (100 000 usagers)	Verdict
Fumée (feu li-ion)	vitesse critique ~2,5 m/s	Le vrai défi ; dimensionne les ventilateurs.
Investissement	~600 M\$ (dont ~375 M\$ de puits)	Réaliste mais optimiste ; couvert par la contingence.
Exploitation	~3–4,5 M\$/an	Mineur, grâce à l'hydroélectricité.

### À retenir

Un tunnel à vélos est presque trivial à aérer au quotidien (pas de moteurs = pas de gaz d'échappement), naturellement frais grâce au sol profond, et peu coûteux à faire fonctionner. Le sérieux de l'ingénierie doit porter sur le **désenfumage en circulation bidirectionnelle face aux feux de batteries**, et le poste de coût à surveiller, ce sont les **puits de surface en milieu urbain**.

## 15 Limites et étude détaillée à mener

Les chiffres de ce document sont des ordres de grandeur d'ingénierie préliminaire, destinés à argumenter le projet. Une étude détaillée par une firme de génie spécialisée en ventilation de tunnels devrait préciser :

- **Nombre et emplacement exacts des puits de ventilation**, et lesquels sont colocalisés avec des stations (principal levier de coût).
- **Étude de désenfumage** pour la circulation à double sens face à un feu de batterie lithium — cette étude gouverne la taille des ventilateurs.
- **Stratégie anti-condensation estivale** : capacité de déshumidification à l'apport, pente et drainage.
- **Spécification acoustique des ventilateurs** (jet-fans silencieux) inscrite dès l'appel d'offres, pour garantir le 60–65 dB(A).
- **Étendue de la filtration d'air** à l'apport, pour étayer l'argument « air potentiellement plus pur qu'en surface » (la filtration retire les particules, mais seul l'air frais dilue le CO<sub>2</sub>).

## 16 Annexe : formules et facteurs utilisés

Les calculs reposent sur les relations suivantes.

### Débit d'air dans un tronçon

$$\text{Débit (m}^3/\text{h)} = \text{section libre (m}^2) \times \text{vitesse (m/s)} \times 3\,600$$

### Hausse de concentration de CO<sub>2</sub>

$$\text{Hausse (fraction)} = \text{production de CO}_2 \text{ (m}^3/\text{h)} / \text{débit d'air (m}^3/\text{h)}$$

1 ppm = 0,000001 en fraction volumique

### Élévation de température

Hausse (degrés C) = puissance (W) / (débit massique x chaleur massique)  
débit massique = débit (m<sup>3</sup>/s) x 1,2 kg/m<sup>3</sup>  
chaleur massique de l'air = 1 005 J/kg.K

## Occupation simultanée

Présents simultanément = débit horaire de pointe (trajets/h)  
x durée moyenne du trajet (h)

## Facteurs et conversions

1 L/min = 0,06 m<sup>3</sup>/h  
CO2 produit = O2 consommé x quotient respiratoire (~0,9)  
1 L O2/min ~ 350 W de puissance métabolique  
Densité de l'air = ~1,2 kg/m<sup>3</sup>  
Section libre 7 m<sup>2</sup> = bore 3,6 m, segment au-dessus de la chaussée

---

Vélo Tunnel Québec — projet citoyen de Philippe Leblond. Ce document est fourni à titre informatif. Les valeurs définitives requièrent une étude détaillée par une firme de génie spécialisée en ventilation de tunnels.