

Comment fonctionne cet outil ?

Cet outil estime le **VO₂max nécessaire pour produire certaines performances cyclistes**, afin d'évaluer si elles restent physiologiquement plausibles.

À partir d'une puissance sur 5 minutes et d'un paramètre d'endurance, il reconstruit un **profil puissance-durée théorique** et interpole la puissance maximale soutenable autour de **7 minutes**, zone proche de la **puissance maximale aérobie (PMA)**.

Une correction est appliquée pour tenir compte de la **contribution anaérobie** (estimée comme une fraction de la capacité W'), afin d'isoler la puissance réellement produite par le métabolisme aérobie.

Cette puissance est ensuite convertie en **consommation d'oxygène (VO₂)** en fonction du **rendement mécanique**, puis **corrigée des effets de l'altitude et de la température**, qui influencent la densité de l'air et donc la performance.

Enfin, plusieurs paramètres comportant une incertitude (rendement, endurance, part anaérobie, température) sont simulés par **méthode Monte-Carlo**, ce qui permet d'obtenir une **plage probable de VO₂max** plutôt qu'une valeur unique.

Le résultat est ensuite comparé aux valeurs observées chez les athlètes d'élite pour indiquer si la performance apparaît **exceptionnelle, étonnante ou hors normes**.

Principe du détecteur de puissance extra-physiologique

Cet outil vise à estimer le **VO₂max nécessaire pour produire certaines performances en cyclisme**, puis à vérifier si ce VO₂max reste dans une plage physiologiquement plausible.

L'approche repose sur quatre étapes principales :

1. reconstruction d'un **profil puissance-durée (PPR)**,
2. estimation de la **puissance maximale aérobie (PMA)**,
3. conversion de cette puissance en **VO₂max**,
4. propagation des **incertitudes physiologiques et environnementales**.

1. Reconstruction du profil puissance-durée

L'outil commence par reconstruire un **profil puissance-durée théorique** à partir de quelques paramètres simples :

- puissance maximale sur **5 minutes (P5)**
- **endurance** exprimée en %
- masse du coureur

L'endurance représente la capacité à maintenir une puissance élevée lorsque la durée augmente.

À partir de ces paramètres, l'outil génère un profil de puissance pour différentes durées typiques :

- 5 min
- 10 min
- 20 min

- 30 min
- 60 min
- 120 min

Ces puissances sont obtenues en appliquant un **facteur d'endurance décroissant avec la durée**.

2. Interpolation des puissances

Une fois ces points connus, l'outil peut estimer la puissance pour **n'importe quelle durée intermédiaire**.

Pour cela on utilise une **interpolation logarithmique**, ce qui est cohérent avec la forme connue des relations puissance-durée.

On suppose que la relation entre puissance et durée suit approximativement :

$$P(t) = a \cdot t^b$$

Cette relation devient linéaire en utilisant les logarithmes :

$$\log(P) = \log(a) + b \log(t)$$

Entre deux points connus du profil puissance-durée, la puissance intermédiaire est donc obtenue par interpolation dans l'espace logarithmique.

Cela permet d'obtenir une estimation cohérente de la puissance pour une durée donnée, par exemple **7 minutes**, durée choisie comme approximation de la zone proche de la PMA.

3. Estimation de la PMA

La **puissance maximale aérobie (PMA)** correspond à la puissance produite lorsque l'organisme atteint son **VO₂max**.

Dans cet outil, la PMA est estimée comme la **puissance maximale soutenable sur environ 7 minutes**.

Cette durée est choisie car :

- les tests de PMA durent généralement **5 à 8 minutes**
- cette durée correspond à la zone où l'on atteint le **VO₂max**

La puissance interpolée à **7 minutes** constitue donc une estimation de la PMA.

4. Correction de la contribution anaérobie

Même sur un effort de 7 minutes, une petite partie de l'énergie peut provenir du **métabolisme anaérobie**.

Pour en tenir compte, l'outil estime la **capacité de travail anaérobie W'** .

Une fraction de cette capacité est supposée être utilisée pendant l'effort.

Dans la version actuelle de l'outil, on considère que :

$$\text{énergie anaérobie utilisée} = 50\% \times W'$$

Cette énergie est convertie en puissance moyenne sur 7 minutes :

$$P_{\text{anaérobie}} = \frac{0.5 \times W'}{420}$$

La puissance réellement attribuable au métabolisme aérobie devient donc :

$$P_{\text{aérobie}} = P_{7\text{min}} - P_{\text{anaérobie}}$$

5. Conversion de la puissance en VO_2

La conversion repose sur deux paramètres :

rendement mécanique

Le rendement représente la fraction de l'énergie métabolique transformée en travail mécanique.

Chez les cyclistes entraînés il se situe généralement entre :

20 et 23%

La relation entre puissance mécanique et puissance métabolique est donc :

$$P_{\text{métabolique}} = \frac{P_{\text{mécanique}}}{\eta}$$

où :

$$\eta = \text{rendement}$$

équivalent énergétique de l'oxygène

Lorsque le quotient respiratoire est proche de **1**, l'équivalent énergétique est approximativement :

$$1 \text{ L } O_2 \approx 20 \text{ kJ}$$

La consommation d'oxygène devient donc :

$$VO_2 = \frac{P_{\text{métabolique}}}{20}$$

On obtient ainsi le $VO_{2\text{max}}$ nécessaire pour produire la puissance estimée.

Influence physiologique de l'altitude

L'altitude influence aussi la **consommation maximale d'oxygène ($VO_{2\text{max}}$)**.

Lorsque l'altitude augmente :

- la pression partielle d'oxygène diminue,
- la $VO_{2\text{max}}$ diminue généralement d'environ **6 à 8 % par 1000 m** au-dessus de 1500 m.

Dans l'outil, cette baisse physiologique est également prise en compte dans l'estimation finale du $VO_{2\text{max}}$ nécessaire.

Influence de la température sur le rendement métabolique

La température ambiante influence la capacité de l'organisme à produire un effort prolongé et peut modifier légèrement le **rendement métabolique du pédalage**.

Lorsque la température augmente, plusieurs phénomènes physiologiques apparaissent :

- augmentation de la **température corporelle**
- augmentation de la **fréquence cardiaque**
- redistribution du débit sanguin vers la **peau pour la thermorégulation**
- augmentation du **coût énergétique de la ventilation et de la circulation**

Ces adaptations entraînent une **légère diminution de l'efficacité mécanique globale**, c'est-à-dire que pour produire la même puissance mécanique, l'organisme doit consommer légèrement plus d'énergie métabolique.

Ordre de grandeur de l'effet

Les études sur l'exercice en environnement chaud montrent que l'efficacité mécanique peut diminuer lorsque la température ambiante dépasse environ **20 à 25 °C**.

L'effet reste modéré mais mesurable :

- environ **0,1 à 0,3 point de rendement** par tranche de **10 °C** d'augmentation.

Par exemple :

Température Rendement typique

15 °C	~23 %
25 °C	~22,8–23 %
35 °C	~22,5–22,8 %

Cet effet reste relativement faible comparé à d'autres sources d'incertitude (position aérodynamique, fatigue, hydratation, etc.), mais il est suffisant pour être intégré dans un modèle visant à estimer des limites physiologiques.

6. Prise en compte des incertitudes

Plusieurs paramètres physiologiques ou environnementaux comportent une incertitude :

- rendement mécanique
- part anaérobie utilisée
- endurance
- température

Plutôt que d'utiliser une seule valeur, l'outil utilise une **simulation Monte Carlo**.

Le principe est simple :

1. chaque paramètre est tiré aléatoirement dans sa plage d'incertitude
2. le VO_2max est recalculé
3. l'opération est répétée **plusieurs milliers de fois**

Cela permet d'obtenir une **distribution de VO_2max possibles**.

Le résultat final est présenté sous la forme :

$$VO_2max = valeur\ centrale \pm incertitude$$

ainsi qu'un **intervalle de confiance**.

Cette approche permet d'éviter les conclusions excessives liées à un seul jeu de paramètres.


7. Classification physiologique

Le VO_2max estimé est ensuite comparé aux valeurs observées chez les athlètes.

Les couleurs indiquent le niveau physiologique requis :

 **Vert — Exceptionnel**

niveau observé chez les meilleurs athlètes d'endurance.

 **Orange — Étonnant**

valeurs rares mais plausibles.

● **Rouge — Hors normes**

niveau très difficile à expliquer par la physiologie connue.

● **Marron — Mutant**

niveau dépassant largement les valeurs mesurées dans la littérature scientifique.

Conclusion

Cet outil ne prétend pas mesurer directement le $VO_2\text{max}$ d'un athlète.

Il permet plutôt d'estimer le **$VO_2\text{max}$ minimal nécessaire pour produire certaines performances**, en tenant compte :

- de la contribution anaérobie,
- du rendement mécanique,
- des conditions environnementales
- des incertitudes physiologiques.

Lorsque les valeurs nécessaires dépassent largement les limites physiologiques connues, la performance peut être considérée comme **extra-physiologique** et mérite une analyse plus approfondie.
