

Seminar in physiology and instrumentation

L'oxymétrie de pouls :

principes physiologiques, technologiques et applications cliniques

Aurel Drouart

12/12/2024

Sommaire



1 Introduction

2 Physiologie

3 Mécanismes

4 Applications

5 Limites

6 Marché et perspectives

1. Introduction

L'oxymétrie de pouls

est une méthode non invasive qui permet une surveillance continue de la saturation en oxygène du sang, exprimée par SpO_2 (Saturation en Oxygène Périphérique). Elle est largement utilisée dans les contextes médicaux.

- **Sources lumineuses (LED) :** Émettent de la lumière à des longueurs d'onde spécifiques (rouge et infrarouge).
- **Photodétecteur :** Capture la lumière transmise à travers les tissus.
- **Microprocesseur :** Calcule la SpO_2 en analysant les différences d'absorption lumineuse entre l'hémoglobine oxygénée et désoxygénée.



2. Physiologie

L'oxygène

pénètre dans le corps via les poumons, où il se lie à l'hémoglobine, une protéine des globules rouges. L'hémoglobine transporte l'oxygène vers les tissus et les organes, à travers les artères, où il est nécessaire à la production d'énergie. Une fois l'oxygène délivré, l'hémoglobine retourne aux poumons via les veines, transportant du dioxyde de carbone et d'autres déchets pour être expulsés.

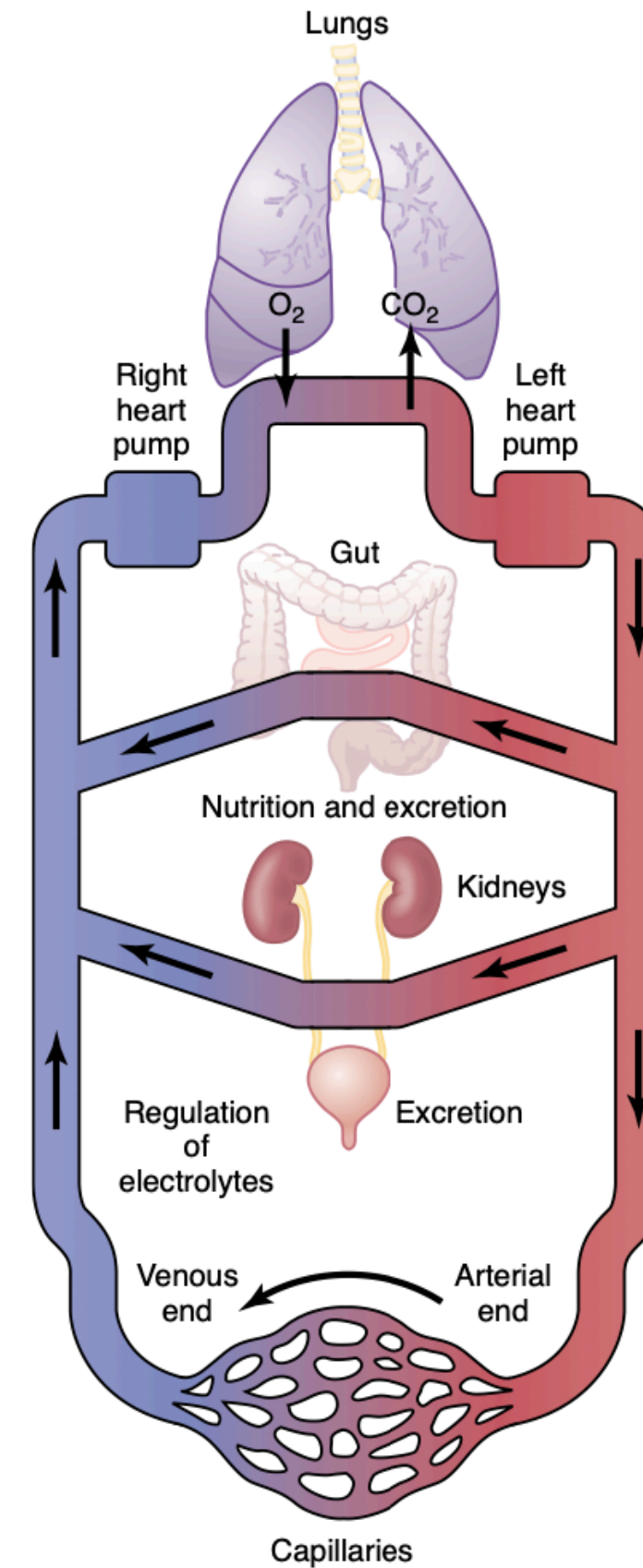


Figure 1-1

General organization of the circulatory system.

2. Physiologie

2.1 Ventilation pulmonaire

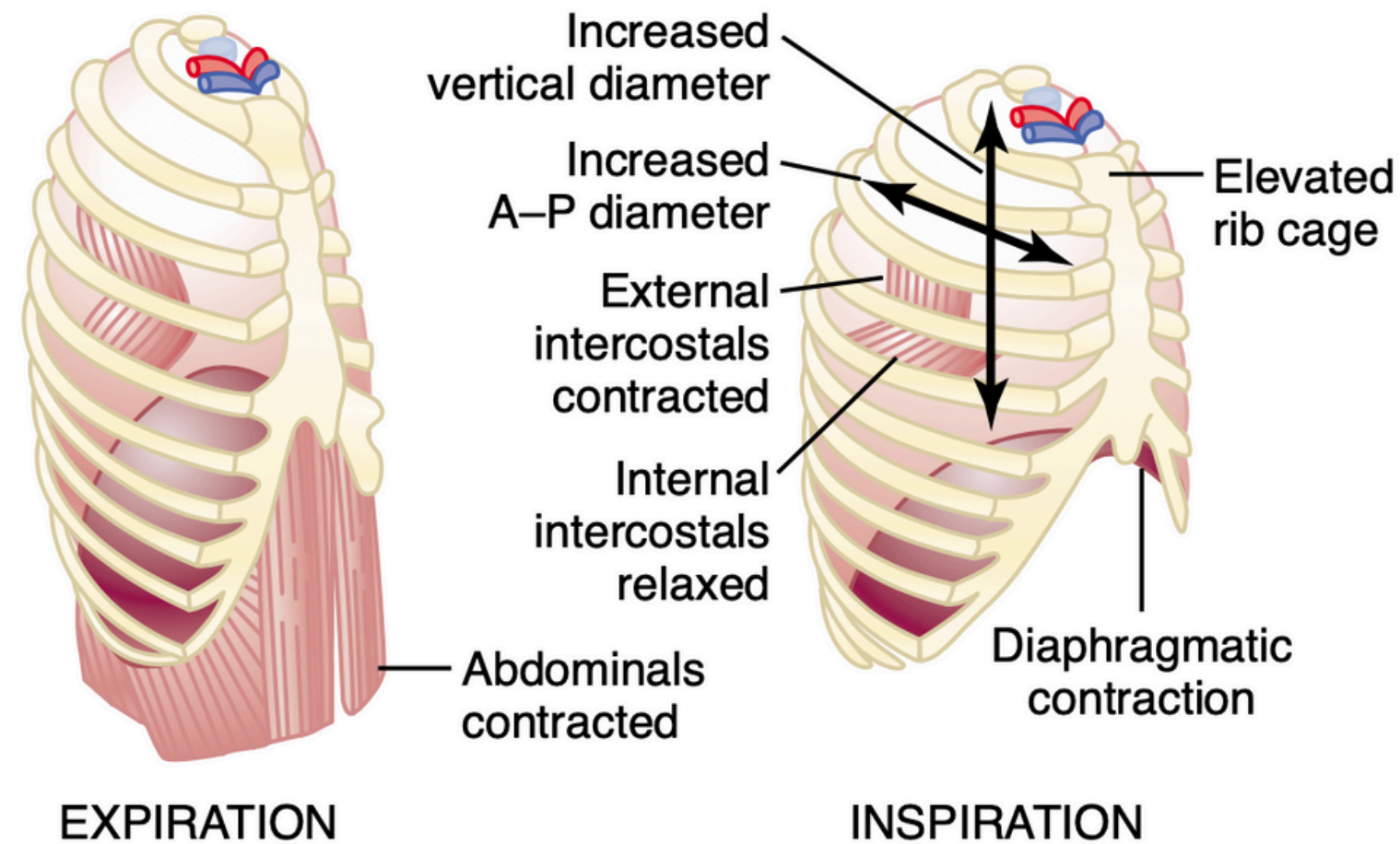


Figure 37–1

Contraction and expansion of the thoracic cage during expiration and inspiration, demonstrating diaphragmatic contraction, function of the intercostal muscles, and elevation and depression of the rib cage.

La **Figure 37–1** montre comment la respiration se produit grâce aux mouvements coordonnés du diaphragme et des muscles intercostaux.

- Lors de l'inspiration, le diaphragme se contracte, augmentant le volume thoracique, ce qui permet à l'air de pénétrer dans les poumons.
- Pendant l'expiration, ce processus est inversé, permettant l'expulsion du dioxyde de carbone.

2. Physiologie

2.1 Ventilation pulmonaire

Ces changements de pression sont représentés dans la **Figure 37–2**, où l'on voit que l'expansion des poumons est associée à une diminution de la pression alvéolaire, favorisant ainsi l'entrée d'air. Ce mécanisme garantit que l'oxygène atteint les alvéoles, où il peut être diffusé dans le sang.

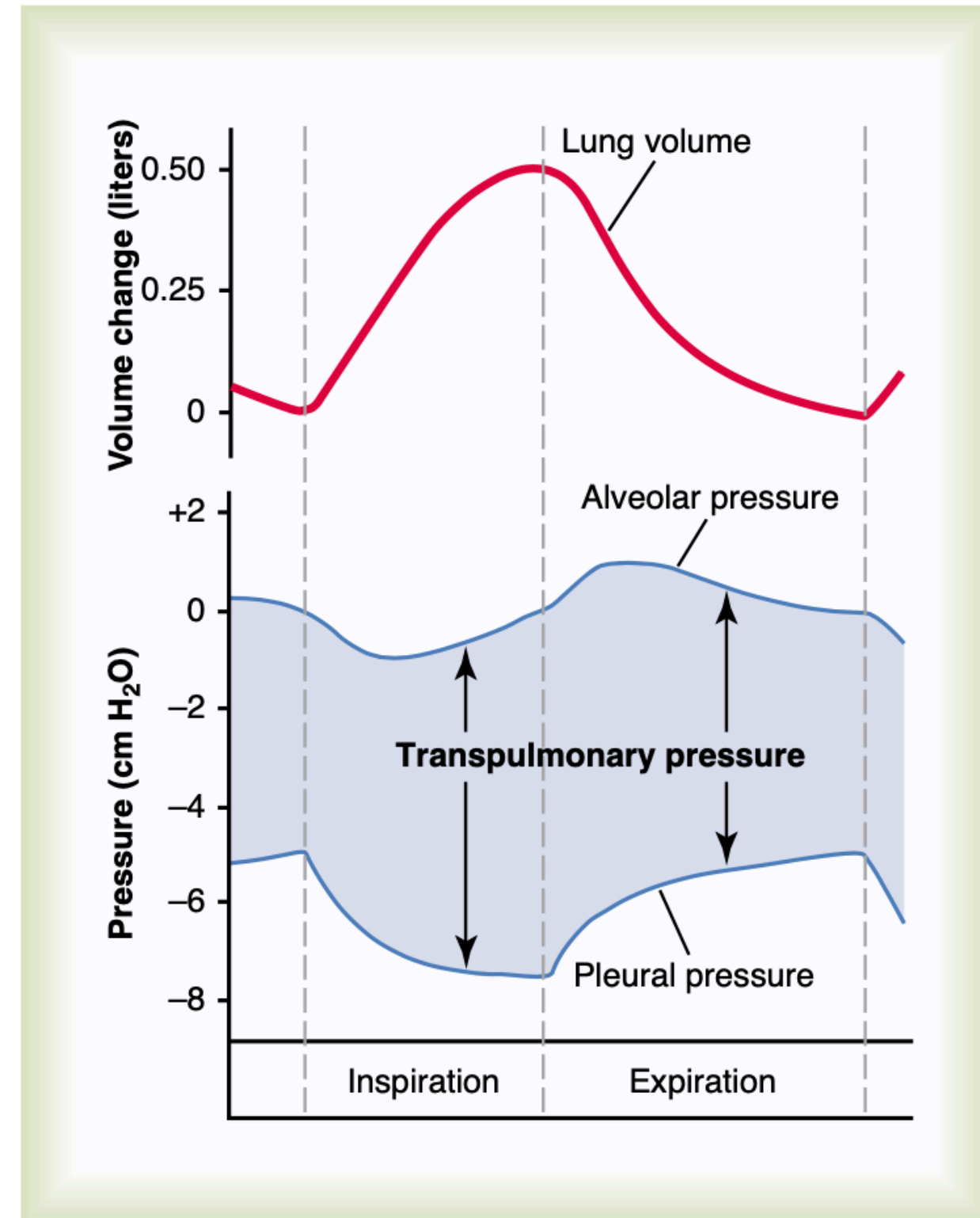


Figure 37–2

Changes in lung volume, alveolar pressure, pleural pressure, and transpulmonary pressure during normal breathing.

2. Physiologie

2.2 Diffusion de l'oxygène dans les alvéoles

L'oxygène contenu dans l'air inspiré traverse la fine paroi des alvéoles pour diffuser dans le sang des capillaires pulmonaires. Simultanément, le dioxyde de carbone (CO_2) diffuse du sang vers les alvéoles pour être expiré. Ce processus est permis grâce à la différence de pression partielle des gaz (gradient de pression) entre l'air alvéolaire et le sang.

La **Figure 40–1** illustre le processus d'échange gazeux entre les alvéoles et les capillaires pulmonaires.

- L'oxygène diffuse des alvéoles, où la pression partielle d'oxygène (PO_2) est élevée (~ 104 mmHg), vers le sang capillaire pulmonaire, où la PO_2 est plus faible (~ 40 mmHg).
- Ce gradient de pression permet un transfert rapide et efficace de l'oxygène vers le sang, saturant presque entièrement l'hémoglobine en oxygène.

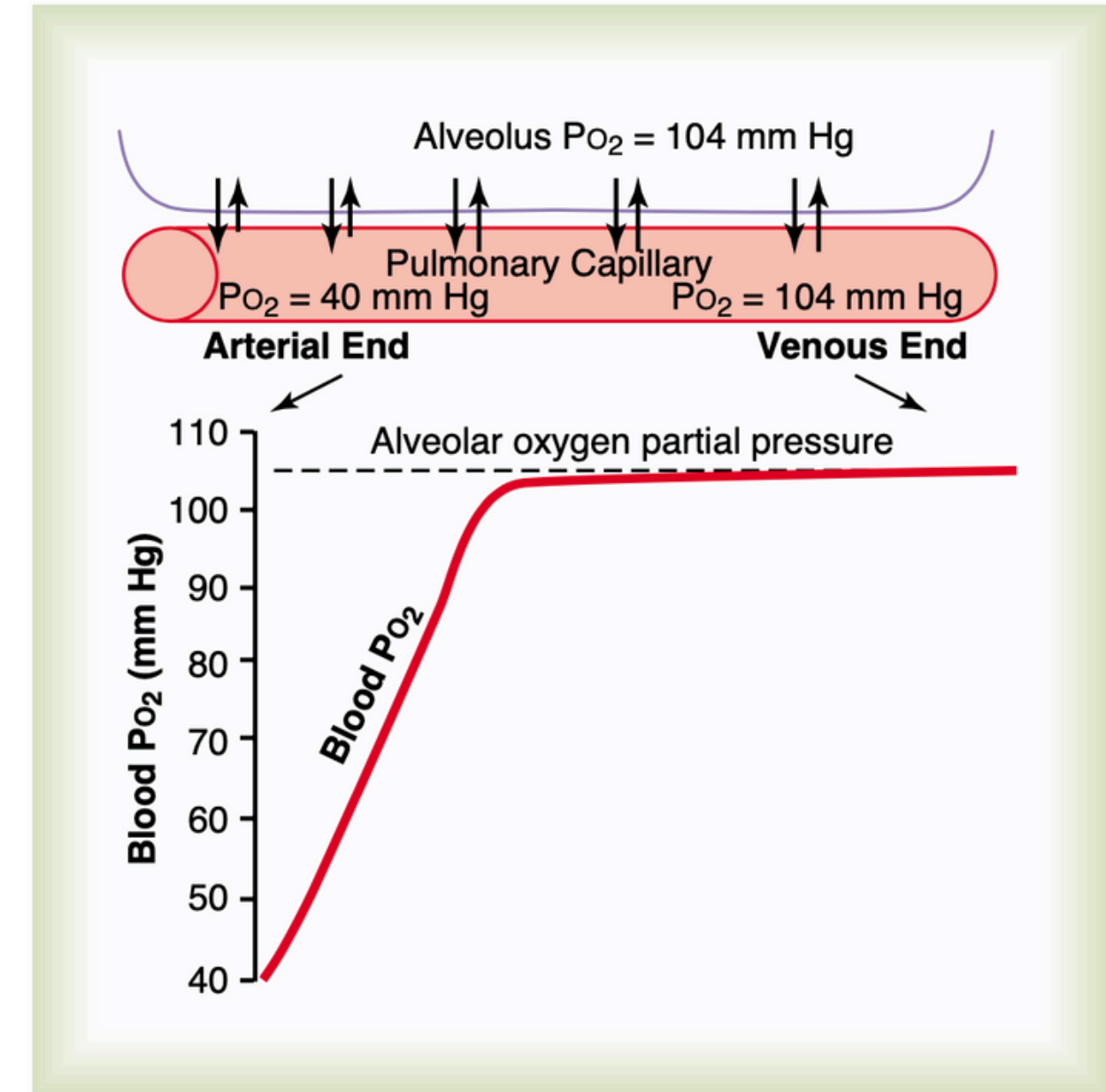


Figure 40–1

Uptake of oxygen by the pulmonary capillary blood. (The curve in this figure was constructed from data in Milhorn HT Jr, Pulley PE Jr: A theoretical study of pulmonary capillary gas exchange and venous admixture. Biophys J 8:337, 1968.)

2. Physiologie

2.3 Transport de l'oxygène : le rôle de l'hémoglobine

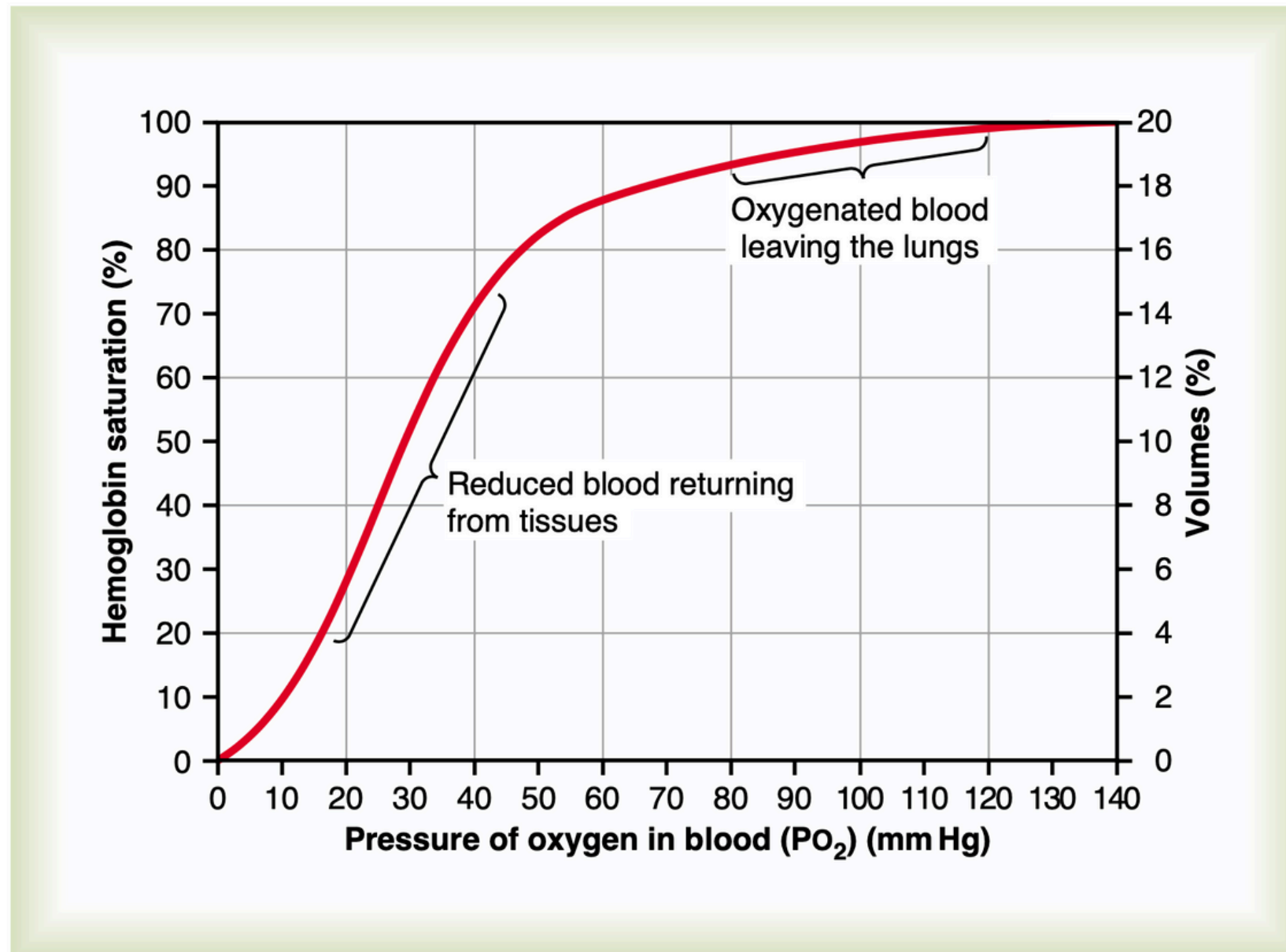


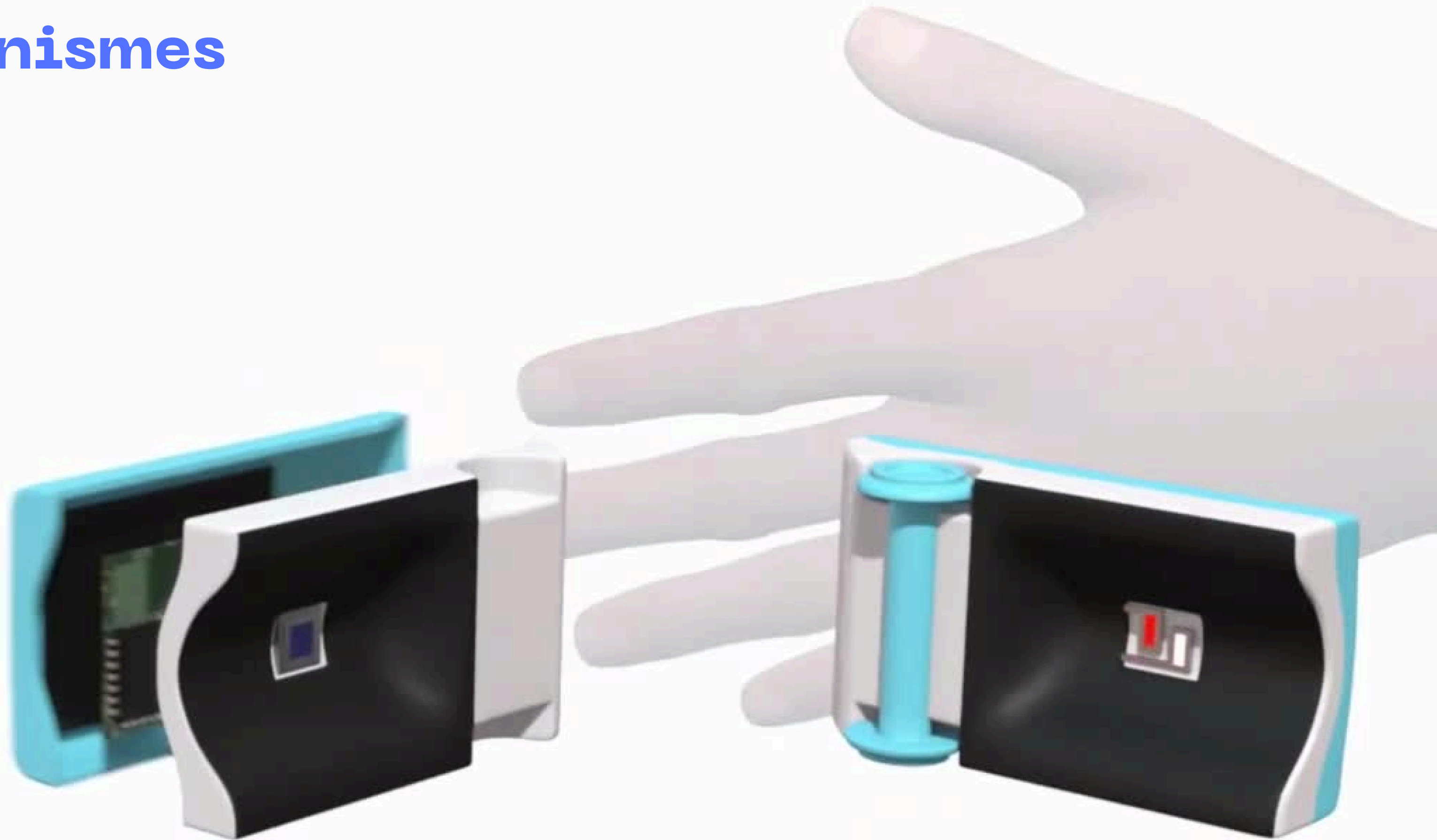
Figure 40–8

Oxygen-hemoglobin dissociation curve.

Une fois dans le sang, l'oxygène est principalement transporté par l'hémoglobine, comme montré dans la **Figure 40–8**, qui présente la courbe de dissociation de l'hémoglobine. Cette courbe décrit la relation entre :

- La saturation en oxygène de l'hémoglobine (SpO_2).
- La pression partielle d'oxygène (PO_2).
- Lorsque la PO_2 est élevée, comme dans les capillaires pulmonaires (environ 95 mmHg), l'hémoglobine est presque totalement saturée (~97 %).
- En revanche, dans les tissus où la PO_2 est plus faible (environ 40 mmHg), l'oxygène est libéré pour répondre aux besoins métaboliques des cellules.

3. Mécanismes

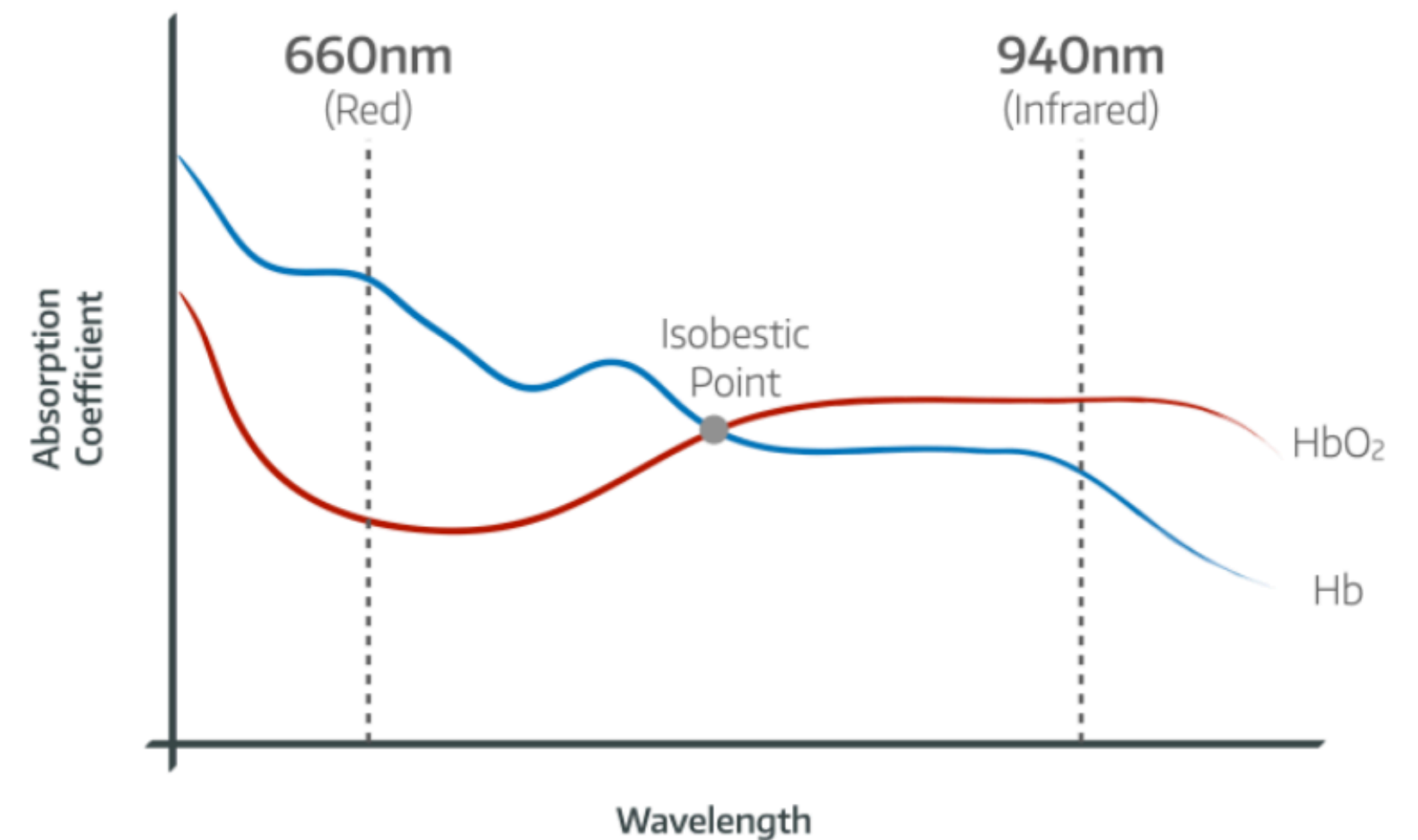
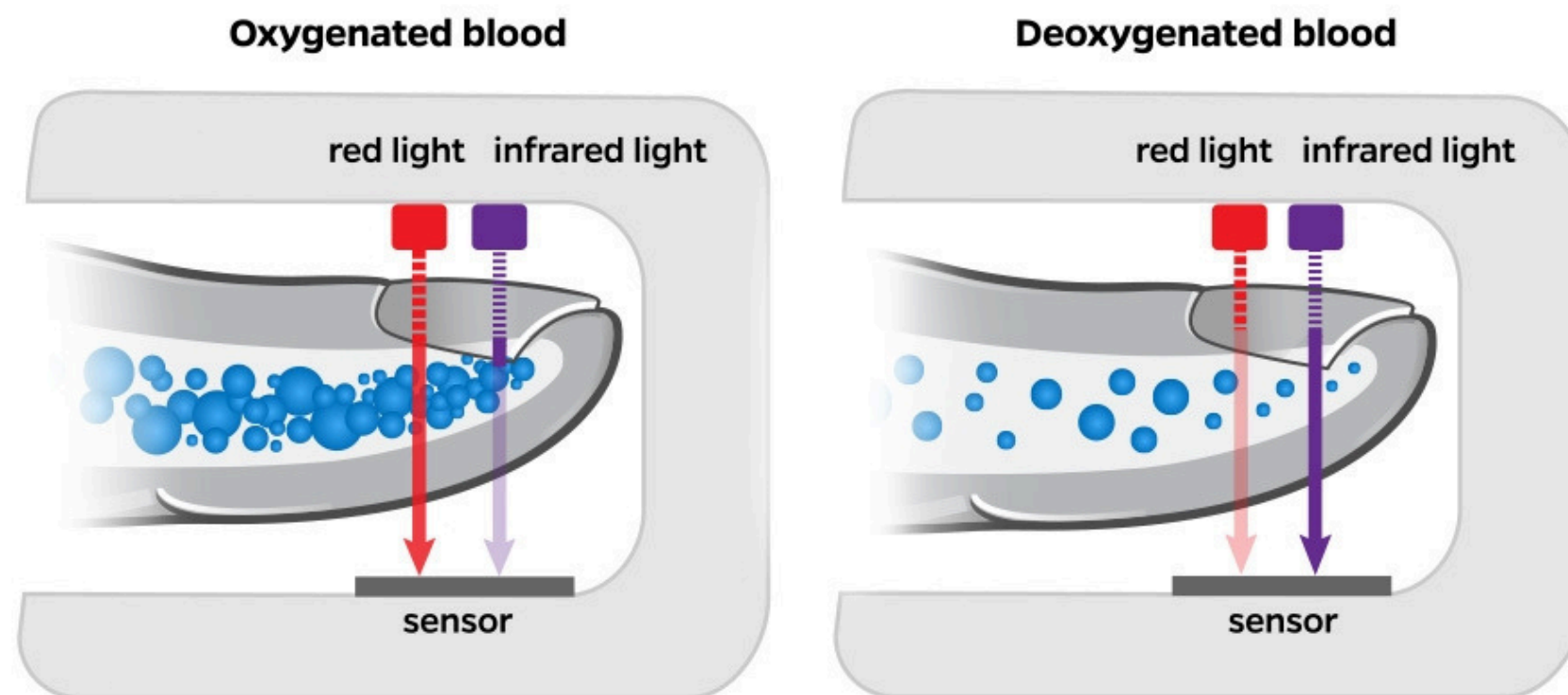


3. Mécanismes

3.1 Principe physique de l'absorption de la lumière

Oxyhémoglobine (HbO₂) : absorbe plus de lumière dans la gamme infrarouge (environ 940 nm)

• **Désoxyhémoglobine (Hb)** : absorbe plus de lumière dans le spectre rouge (environ 660 nm)



$$SpO_2 = 100 \times \frac{C[HbO_2]}{C[HbO_2] + C[Hb]}$$

3. Mécanismes

3.2 Filtrage du signal pulsatile et du signal artériel

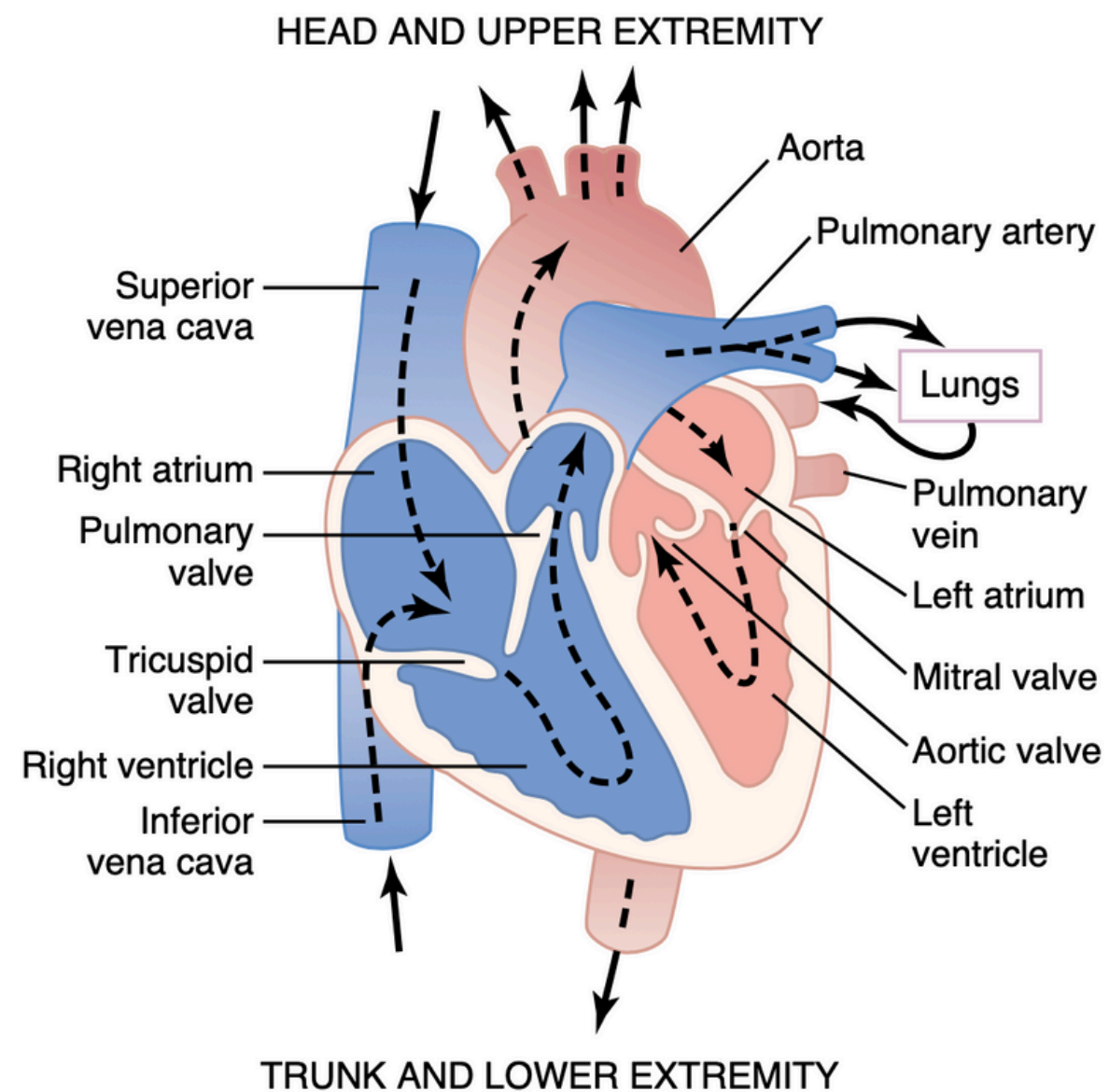
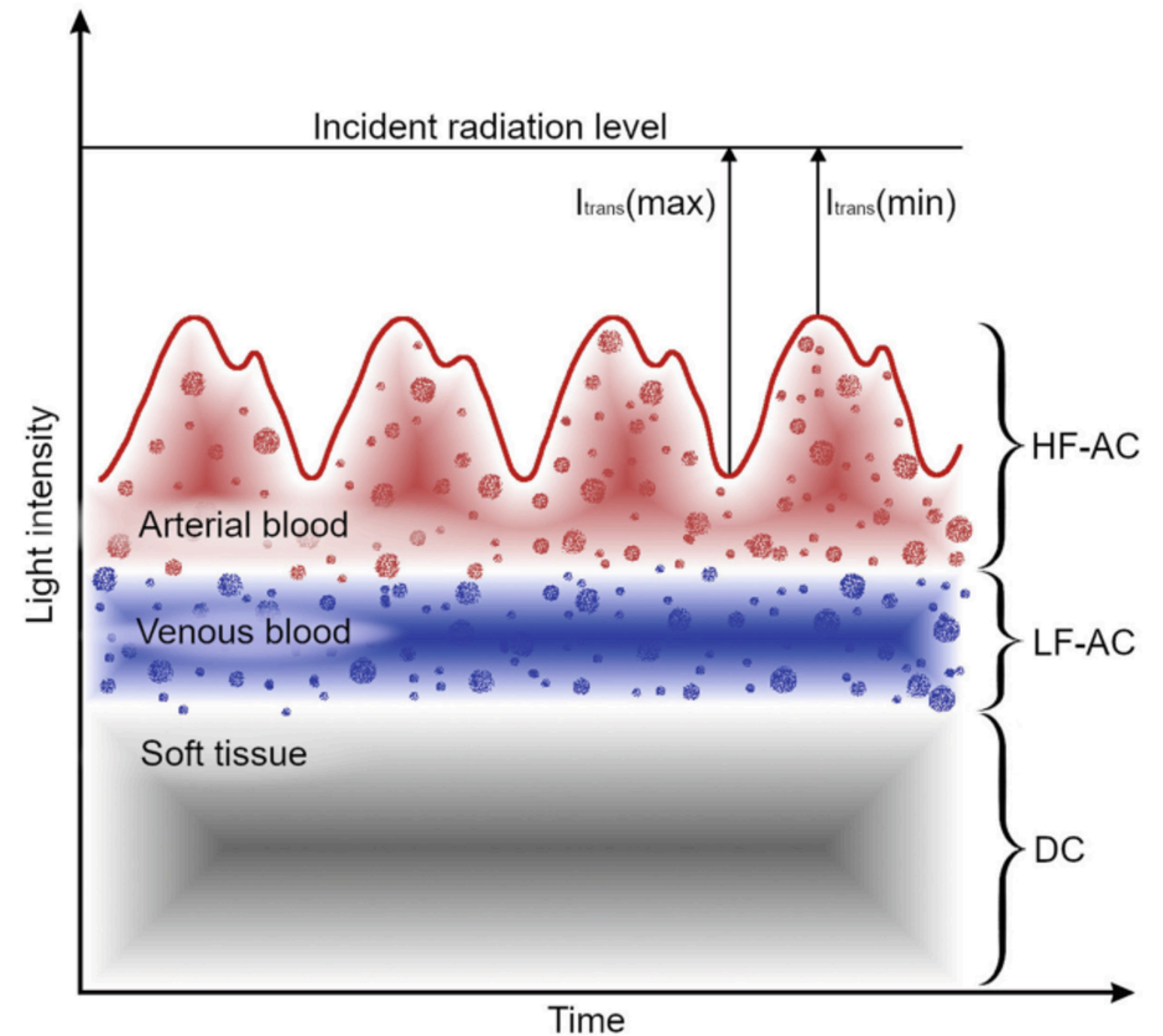


Figure 9-1

Structure of the heart, and course of blood flow through the heart chambers and heart valves.



3. Mécanismes

3.3 Calcul du niveau d'oxygène (SpO₂)

Loi de Beer–Lambert : $A_t = A_v + A_a = \varepsilon_v b_v c_v + \varepsilon_a b_a c_a$

$$\frac{dA_t}{dt} = \left(\frac{db_v}{dt} \right) (\varepsilon_v c_v) + \left(\frac{db_a}{dt} \right) (\varepsilon_a c_a)$$

Comme l'amplitude de la composante LF–AC varie moins, on peut la négliger.
La variation de l'absorption peut être directement liée aux changements dans les artères.

$$R = \frac{\frac{A_{red,AC}}{A_{red,DC}}}{\frac{A_{IR,AC}}{A_{IR,DC}}}$$

La valeur SpO₂ est obtenue en comparant la valeur R avec une table de recherche basée sur des expériences précédentes.

L'algorithme doit être calibré pour prendre en compte la lumière ambiante et la pigmentation de la peau.

4. Applications

- **Surveillance de l'anesthésie** : la surveillance continue de la SpO_2 au bloc opératoire garantit que les niveaux d'oxygène restent dans une plage sûre.
- **Maladies respiratoires** : mesure des niveaux d'oxygène chez les patients souffrant d'asthme, etc.
- **Soins d'urgence et soins intensifs** : surveillance en temps réel de la saturation en oxygène, notamment en cas de détresse respiratoire aiguë.
- **Pandémie de COVID-19** : l'oxymétrie de pouls s'est imposée comme un outil essentiel pour la surveillance des patients, tant à l'hôpital qu'à domicile. L'infection par le SARS-CoV-2 provoque souvent une pneumonie, entraînant une hypoxémie silencieuse, où le patient peut avoir un taux d'oxygène dangereusement bas sans présenter de symptômes respiratoires évidents. Cette utilisation a popularisé ces dispositifs dans les foyers du monde entier, montrant leur importance en télémédecine.

4. Applications

- **Haute altitude** : les alpinistes et trekkeurs utilisent des oxymètres pour surveiller leur SpO_2 , détecter les signes précoces de maladies liées à l'altitude, comme le mal aigu des montagnes, et ajuster leur rythme d'ascension pour s'acclimater en toute sécurité.
- **Sports extrêmes** : ces dispositifs permettent de surveiller l'impact d'efforts intenses ou prolongés sur l'oxygénation des tissus, contribuant à améliorer la performance tout en réduisant les risques de complications liées à l'hypoxémie (ex : ultra-marathons, plongée en apnée)



Namche Bazar, Népal, 3400m

5. Limites

Interférence due à la pigmentation de la peau :

Une peau très pigmentée peut réduire la précision de la mesure. Le vernis à ongles peut interagir avec la lumière émise et déformer le signal.

Conditions de faible perfusion :

En cas de faible débit sanguin (par exemple, chez les patients en état de choc), l'oxymètre peut ne pas détecter un signal suffisamment fort pour permettre des mesures précises.

Artefacts de mouvement :

Les mouvements du patient ou l'instabilité de l'appareil peuvent perturber le signal pulsatile et conduire à des mesures erronées.

De nouvelles technologies avec plus de 2 longueurs d'onde ont vu le jour. Elles permettent de mesurer différents types d'hémoglobine, aident à réduire les erreurs dues aux limitations précédentes et peuvent être utilisées dans une gamme d'applications plus large.

5. Limites

Haute altitude :

En altitude, la diminution de la pression atmosphérique entraîne une baisse normale de la saturation en oxygène (SpO₂). Cette baisse reflète l'adaptation physiologique du corps et ne signale pas nécessairement un problème médical. Interprétation contextuelle : l'oxymétrie de pouls devient ainsi un outil d'accompagnement, non une mesure absolue, en environnement extrême.

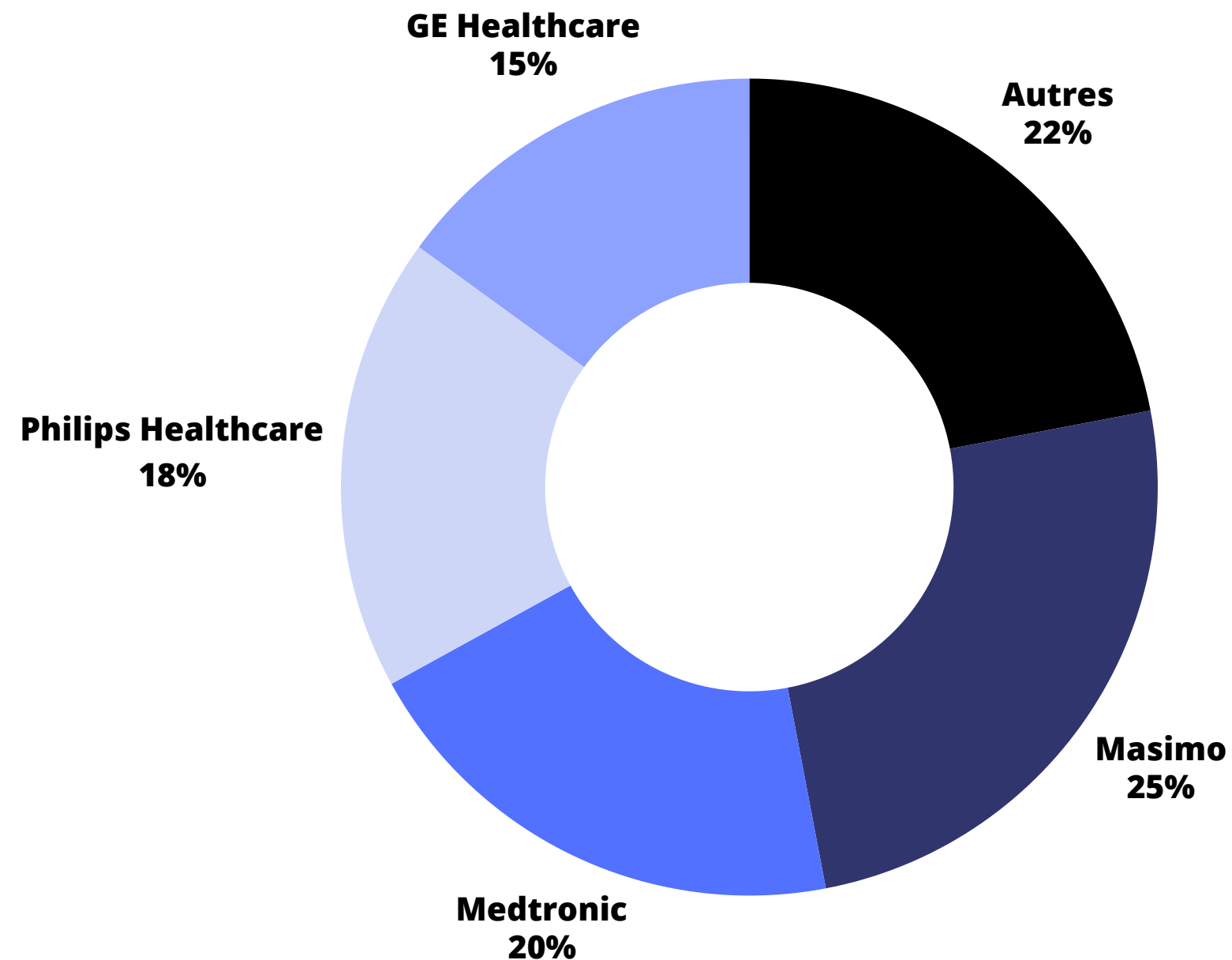
Regd. No. 133214/071/072

 **THE MOUNTAIN MEDICAL INSTITUTE**
द माउन्टेन मेडिकल इन्स्टिट्यूट
Namche 1, Solukhumbu, Nepal | Tel : 038540006

Oxygen Saturation at different altitudes

Altitude:	Oxygen Saturation
Sea level	97 to 100%
1350m (Kathmandu)	90 to 95%
2800m (Lukla)	92 to 93%
3400m (Namche Bazar)	85 to 90%
4000m (Tangboche)	80 to 85%
5000m (Lobuche)	75 to 80%
5500m (Kalapattha/EBC)	70 to 75%

6. Marché et perspectives



Le marché de l'oxymétrie de pouls connaît une croissance significative, portée par l'augmentation de la demande pour des solutions non invasives et portables, particulièrement depuis la pandémie de COVID-19. Ces dispositifs sont devenus essentiels non seulement dans les hôpitaux, mais aussi pour un usage domestique et sportif.

L'Amérique du Nord domine actuellement ce marché, représentant environ 45 % des revenus globaux.

Les innovations technologiques, comme l'intégration d'oxymètres dans des montres connectées et d'autres appareils portables, stimulent encore cette expansion.

6. Marché et perspectives

— Autres principes de mesure : technologies émergentes

1) Co-oxymétrie :

Cette méthode analyse un échantillon de sang pour distinguer les différentes formes d'hémoglobine :

- HbO₂ (oxyhémoglobine).
- HbCO (carboxyhémoglobine, liée à l'intoxication au monoxyde de carbone).
- MetHb (méthémoglobine, associée à certains troubles).

Bien que plus précise, cette technique est invasive et nécessite un équipement spécialisé.

2) Spectroscopie proche infrarouge (NIRS) :

- Technologie émergente mesurant l'oxygénation au niveau local des tissus, comme les muscles ou le cerveau.
- Idéale pour des applications spécifiques : recherche, réanimation néonatale, suivi en chirurgie ou sport de haut niveau.

6. Marché et perspectives

Perspectives d'avenir

- **Miniaturisation** : Intégration dans des appareils portables comme les montres connectées et smartphones.
- **Intelligence artificielle** : Algorithmes avancés pour améliorer la précision et interpréter automatiquement les données.
- **Oxymétrie multi-paramétrique** : Combinaison avec des mesures comme la fréquence cardiaque, le CO₂ ou d'autres biomarqueurs pour une analyse complète de l'état physiologique.

En conclusion, bien que l'oxymétrie de pouls ne remplace pas la gazométrie artérielle ou d'autres techniques spécialisées, elle reste un outil indispensable et polyvalent. Grâce à son accessibilité et à ses innovations continues, elle transforme la surveillance de l'oxygénation en un pilier de la santé moderne.

Conclusion

- Méthode rapide, simple à utiliser, indolore et non invasive
- Mesure la concentration d'oxygène dans le sang
- Largement utilisée dans les hôpitaux et pour l'automédication



Merci !

Bibliographie

1 : Hall, J. E. (2006). Guyton and Hall Textbook of Medical Physiology.

https://moodle.epfl.ch/pluginfile.php/1536111/mod_resource/content/3/Guyton.pdf

2 : Chan, Edward D., Michael M. Chan, and Mallory M. Chan. 2013. "Pulse Oximetry: Understanding Its Basic Principles Facilitates Appreciation of Its Limitations." Respiratory Medicine 107 (6): 789–99.

<https://doi.org/10.1016/j.rmed.2013.02.004>.

3 : Jubran, Amal. 2015. "Pulse Oximetry." Critical Care 19 (1): 272. <https://doi.org/10.1186/s13054-015-0984-8>.

4 : Leppänen, Timo, Samu Kainulainen, Henri Korkalainen, Saara Sillanmäki, Antti Kulkas, Juha Töyräs, and Sami Nikkonen. 2022. "Advances in the Diagnosis and Treatment of Sleep Apnea – Pulse Oximetry: The Working Principle, Signal Formation, and Applications." In Advances in Experimental Medicine and Biology. Vol. 1384.

https://doi.org/10.1007/978-3-031-06413-5_12.

5 : "Pulse Oximetry." n.d. Yale Medicine. Accessed November 28, 2024.

<https://www.yalemedicine.org/conditions/pulse-oximetry>.

6 : Unisciel, dir. 2023. Comment Mesure-t-on Le Taux d'oxygène Dans Le Sang ?<https://www.youtube.com/watch?v=UbAfjzARcmM>.

7 : Blaisdell, Carol J., Steve Goodman, Karen Clark, James F. Casella, and Gerald M. Loughlin. 2000. "Pulse Oximetry Is a Poor Predictor of Hypoxemia in Stable Children With Sickle Cell Disease." Archives of Pediatrics & Adolescent Medicine 154 (9): 900. <https://doi.org/10.1001/archpedi.154.9.900>.