


# Réflexions Sport

Numéro spécial

# EXTRAIT

## Hypoxie et Performance 2024

*Un projet émergeant  
de « questions de terrain »  
pour améliorer le soutien  
scientifique dans le champ  
du stress environnemental*

A full-page photograph of a female athlete running on a gravel path in a mountainous landscape. She is wearing a pink tank top, black leggings, and blue sneakers. Her hair is tied back and blowing in the wind. The background shows a vast mountain range under a clear blue sky with some clouds.

*Réflexions Sport*, n° 32, novembre 2024 : La science aux service des JOP  
P. 40-51

e-ISSN : 2265-5441

Institut national du sport, de l'expertise et de la performance

---

## **Hypoxie et Performance 2024**

***Un projet émergeant de « questions de terrain »  
pour améliorer le soutien scientifique dans le champ  
du stress environnemental***

### **Franck Brocherie**

Laboratoire Sport, expertise et performance (UR 7370), Institut national du sport, de l'expertise et de la performance (INSEP), Paris

### **Julien Brugniaux**

Laboratoire Hypoxie physiopathologie cardiovasculaire et respiratoire (HP2, INSERM U1042), Université Grenoble Alpes

### **Phillipe Connes**

Laboratoire inter-universitaire de biologie de la motricité (LIBM, UR 7424), Université Claude Bernard Lyon 1

### **Stéphane Dufour**

Centre européen d'enseignement, de recherche et d'innovation en physiologie de l'exercice (CEERIPE, UR 3072), Université de Strasbourg

### **Anne-Fleur Gaston**

Laboratoire interdisciplinaire performance santé environnement de montagne (LIPSEM, UR 4604), Université de Perpignan Via Domitia

### **Philippe Gimenez**

Laboratoire Culture, sport, santé, société (C3S, UR 4660), UFR STAPS Besançon, Université de Franche-Comté

### **Grégoire P. Millet**

Université de Lausanne, Suisse

## **Elie Nader**

Laboratoire inter-universitaire de biologie de la motricité (LIBM, UR 7424), Université Claude Bernard Lyon 1

## **Aurélien Pichon**

Laboratoire MOVE (UR 20296), UFR STAPS Poitiers, Université de Poitiers

## **Paul Robach**

École nationale des sports de montagne (ENSM), Chamonix

## **Xavier Woorons**

Association pour la recherche et la promotion de l'entraînement en hypoventilation (ARPEH), Lille

## **Résumé**

Depuis les Jeux olympiques de Mexico 1968, l'évolution technologique et les avancées scientifiques ont contribué au développement de différentes méthodes d'entraînement en altitude/hypoxie bénéfiques pour les différentes disciplines olympiques. Toutefois, différents aspects tels que la planification des méthodes, le suivi de la dose hypoxique, de la charge d'entraînement, de la fatigue et la variabilité individuelle des réponses restent encore sous-investigués. Le projet HYPOXPERF, co-construit avec les fédérations accompagnées, participe à l'amélioration des connaissances scientifiques en apportant des résultats nouveaux relatifs à l'identification des réponses individuelles, à la validité de méthodes combinées ou encore aux adaptations croisées. Il a permis d'affiner les recommandations pratiques en faisant aussi émerger de nouvelles demandes de suivi, d'accompagnement scientifique et de recherche qui s'inscrivent dans la préparation de nouvelles échéances olympiques d'été ou d'hiver (Los Angeles 2028 ; Cortina 2026 et Alpes Françaises 2030) avec des opportunités de transfert à l'échelle du grand public en termes de santé et bien-être.

Mots-clés : altitude, stress environnemental, fatigue, entraînement, individualisation, marqueurs physiologiques, réponses psychologiques.

Le projet Hypoxie et Performance 2024 bénéficie d'une aide de l'État gérée par l'Agence nationale de la recherche au titre du programme d'investissements d'avenir portant la référence ANR-20-STHP-0002.

# Hypoxie et Performance 2024

*Un projet émergeant  
de « questions de terrain »  
pour améliorer le soutien  
scientifique dans le champ  
du stress environnemental*

## **Franck Brocherie**

Laboratoire Sport, expertise et performance (UR 7370),  
Institut national du sport, de l'expertise et de la performance (INSEP), Paris

## **Julien Brugniaux**

Laboratoire Hypoxie physiopathologie cardiovasculaire et respiratoire  
(HP2, INSERM U1042), Université Grenoble Alpes

## **Phillipe Connes**

Laboratoire inter-universitaire de biologie de la motricité (LIBM, UR 7424),  
Université Claude Bernard Lyon 1

## **Stéphane Dufour**

Centre européen d'enseignement, de recherche et d'innovation en physiologie  
de l'exercice (CEERIPE, UR 3072), Université de Strasbourg

## **Anne-Fleur Gaston**

Laboratoire interdisciplinaire performance santé environnement de montagne  
(LIPSEM, UR 4604), Université de Perpignan Via Domitia

## **Philippe Gimenez**

Laboratoire Culture, sport, santé, société (C3S, UR 4660), UFR STAPS Besançon,  
Université de Franche-Comté







**Grégoire P. Millet**

Université de Lausanne, Suisse

**Elie Nader**

Laboratoire inter-universitaire de biologie de la motricité (LIBM, UR 7424),  
Université Claude Bernard Lyon 1

**Aurélien Pichon**

Laboratoire MOVE (UR 20296), UFR STAPS Poitiers, Université de Poitiers

**Paul Robach**

École nationale des sports de montagne (ENSM), Chamonix

**Xavier Woorons**

Association pour la recherche et la promotion de l'entraînement  
en hypoventilation (ARPEH), Lille

## Genèse et objectifs du projet

Plus connu sous son acronyme HYPOXPERF, « **Hypoxie et Performance 2024** » (voir encadré) est un projet émergent d'une réflexion collégiale entre les entraîneurs et athlètes utilisant l'altitude dans leur processus de préparation et les scientifiques experts du domaine et/ou impliqués dans l'accompagnement scientifique qui œuvrent auprès d'eux. Le leitmotiv du projet est de répondre à des « questions de terrain » pour améliorer le soutien scientifique aux entraîneurs et athlètes français dans le champ de l'hypoxie et dans leur préparation aux Jeux olympiques et paralympiques de Paris 2024.

En effet, depuis les Jeux olympiques de Mexico en 1968, l'évolution technologique et les avancées scientifiques ont contribué au développement de différentes méthodes d'entraînement hypoxique. Les méthodes les plus couramment utilisées sont les stages en altitude du type « vivre et s'entraîner en altitude » (LHTH) ou « vivre en altitude et s'entraîner au niveau de la mer » (LHTL), induisant des expositions dites chroniques (> 12-14 heures par jour) et favorisant des adaptations principalement hématologiques (notamment la stimulation de la production des globules rouges). D'autres méthodes plus modernes telles que l'entraînement de la force (RTH) ou de répétition de sprints en hypoxie (RSH) s'appuient sur des expositions aiguës à l'hypoxie et visent des adaptations centrales et périphériques optimisant le transport et l'utilisation de l'oxygène par l'organisme. Ces méthodes récentes sont maintenant applicables à plusieurs sports, qu'il s'agisse de disciplines d'endurance ou de sports intermittents (sports collectifs, sports de raquettes, sports de combat). C'est

entre autres ce qui a conduit les nations du Top-5 des derniers Jeux olympiques à y recourir pour maximiser les performances de leurs athlètes. Ces différentes stratégies d'entraînement hypoxique sont décrites dans le panorama des méthodes d'entraînement en altitude/hypoxique (Brocherie, Girard et Millet, 2017).

Toutefois, l'efficacité de ces méthodes est encore discutée/discutable (Millet et Brocherie, 2020 ; Siebenmann et Dempsey, 2020), notamment en raison de leur mise en œuvre en termes de planification et de suivi des facteurs tels que la dose hypoxique, les charges d'entraînement, la fatigue induite, mais également de la variabilité individuelle des réponses à ces différents facteurs confondants. De plus, le temps de maintien de ces adaptations en vue d'optimiser les performances une fois la stimulation hypoxique terminée reste mal connu. Autant d'éléments importants, encore trop peu étudiés dans la littérature scientifique, laissant parfois les entraîneurs, staffs et accompagnateurs scientifiques avancer sur la seule base de leur expérience empirique.

“... l'évolution technologique et les avancées scientifiques ont contribué au développement de différentes méthodes d'entraînement hypoxique.”

## Membres du consortium HYPOXPERF :



Association pour la recherche et la promotion de l'entraînement en hypoventilation (ARPEH) : Xavier Woorons ; Laboratoire Culture, sport, santé, société (C3S, UR 4660), UFR STAPS Besançon, Université de Franche-Comté : Philippe Gimenez, Alain Gros Lambert, Sidney Grosprêtre, Thibaud Mihailovic, Thibaud Pirlot, Célia Ruffino ; Laboratoire Hypoxie physiopathologie cardiovasculaire et respiratoire (HP2, INSERM U1042), Université Grenoble Alpes : Julien Brugniaux, Stéphane Doutreleau, Samuel Vergès ; Laboratoire MOVE (UR 20296), UFR STAPS Poitiers, Université de Poitiers : Olivier Dupuy, Corentin Faucher, Aurélien Pichon ; Laboratoire interdisciplinaire performance santé environnement de montagne (LIPSEM, UR 4604) et Images Espace-Dev (IED, UMR 228), Université de Perpignan Via Domitia : Fabienne Durand, Éric Fruchart, Anne-Fleur Gaston, Henri Meric, Florence Riera, Samira El Yacoubi ; Laboratoire inter-universitaire de biologie de la motricité (LIBM, UR 7424), Université Claude Bernard Lyon 1 : Romain Carin, Philippes Connes, Elie Nader, Thomas Rupp, Vincent Pialoux ; Centre européen d'enseignement, de recherche et d'innovation en physiologie de l'exercice (CEERIPE, UR 3072), Université de Strasbourg : Julien Blaess, Mourad Boukhari, Stéphane Dufour, Irina Enache, Charles Evrard, Fabrice Favret, Elyse Hucteau, Thomas Hureau, Yao Kouassi, Nabil Kouzkouz, Joris Mallard, Anasthase Massamba, Cristina Pisteu, Allan Pagano ; École nationale des sports de montagne (ENSM) : Paul Robach ; Centre national d'entraînement en altitude (CNEA) : Grégory Doucende, Jérôme Lacroix ; Laboratoire Sport, expertise et performance (SEP, UR 7370) et pôle Médical de l'Institut national du sport, de l'expertise et de la performance (INSEP) : Janne Bouten, Franck Brocherie, Sébastien Le Garrec, Antonio Morales-Artacho, Jean-Paul Richalet ; Fédération française de canoë-kayak (FFCK) : Philippe Colin, Rémi Gaspard ; Fédération française de cyclisme (FFC) : Emmanuel Brunet, Sandrine Guironnet ; Fédération française de judo, jujitsu, kendo et disciplines associées (FFJDA) : Paul-Thierry Pesqué ; Fédération française de lutte et disciplines associées (FFLDA) : Patrick Vazeille ; Fédération française de natation (FFN) : Robin Pla ; Fédération française de rugby (FFR) : Julien Piscione ; Société Inside the Athletes 3.0 : Romain Bouzigon.

Dès lors, par l'intermédiaire d'études pluridisciplinaires appliquées, le projet HYPOXPERF vise à :

- Identifier les réponses hypoxiques individuelles et proposer un entraînement en altitude/hypoxique adapté pour s'acclimater plus rapidement et/ou renforcer/maintenir les gains plus longtemps grâce à l'utilisation d'expositions ou d'exercices hypoxiques additionnels ;
- Valider des méthodes d'acclimatation et/ou d'entraînement hypoxiques combinées ou successives, afin de maximiser les

performances physiques et psychologiques en fonction de la demande sportive ;

- Examiner la possibilité d'éventuelles adaptations croisées entre différents stress environnementaux, tels que l'hypoxie, la chaleur et/ou le froid, ou leur combinaison, afin d'optimiser les adaptations psychophysologiques attendues en réponse à un ou plusieurs facteurs de stress environnementaux.

Le projet s'appuie sur trois lots de travail (*work packages*, WP), soutenus par une approche transversale (WP4) proposant

des outils de mesure communs aux WPs 1-3 s'appuyant sur les données récoltées pour approfondir le suivi et la prédiction des réponses au stress environnemental, avec une attention particulière sur les réponses en fonction du sexe (Jeton *et al.*, 2017 ; Raberin *et al.*, 2023 ; Burtscher *et al.*, 2023) (Fig. 1).

Comprendre le moment optimal pour programmer un camp d'entraînement en

altitude/hypoxie, ses effets physiologiques et psychologiques à court, moyen et long terme, et individualiser la dose hypoxique en fonction de la tolérance de chaque athlète sont des éléments clés qui doivent être fournis aux entraîneurs et aux athlètes. Ces derniers étant susceptibles d'avoir leur propre signature d'adaptation et/ou de déclin une fois revenus au niveau de la mer, mieux appréhender les adaptations

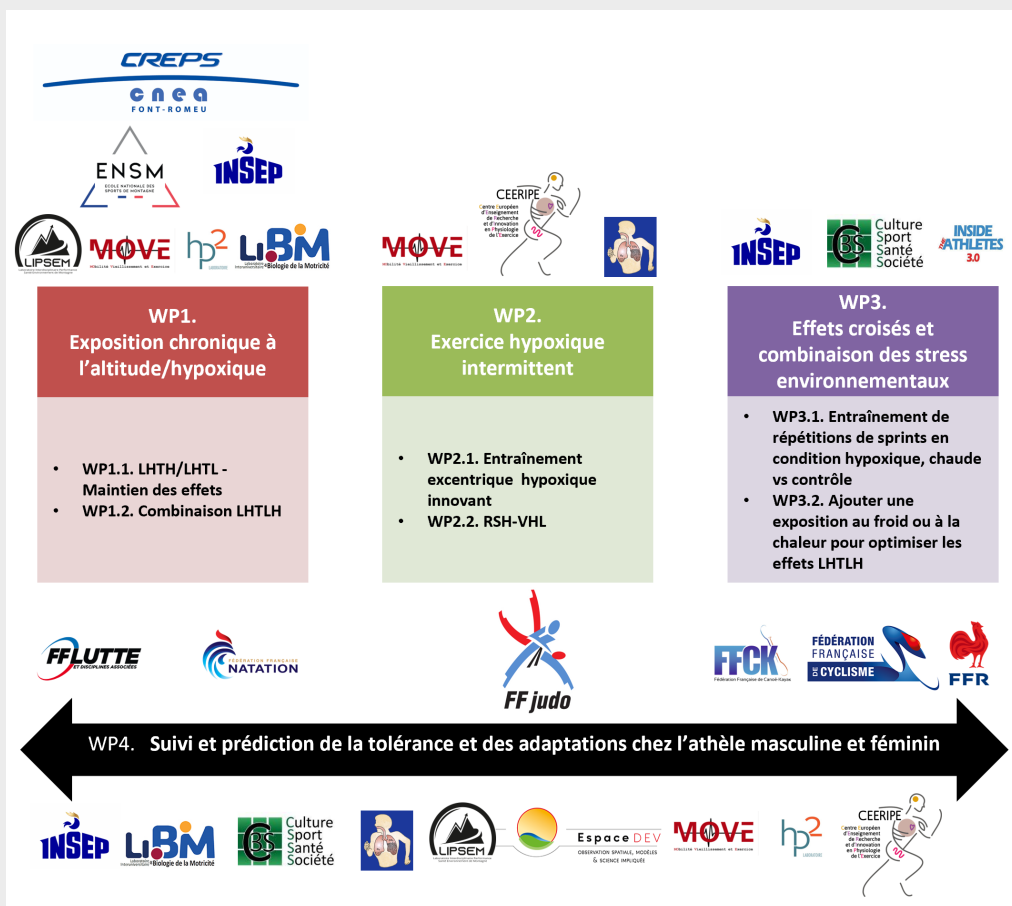


Figure 1 – Les lots de travail du projet HYPOXPERF.



hématologiques et non hématologiques (par ex., neuromusculaires, métaboliques, biochimiques) et leurs cinétiques de dégradation contribuera à l'optimisation des gains potentiels et à leur maintien. Compte tenu du stress supplémentaire imposé par l'hypoxie, l'accompagnement scientifique est capital pour gérer les charges hypoxiques et d'entraînement afin de maximiser les réponses psychophysiologiques tout en évitant tout risque de désentraînement ou de surentraînement. De même, les effets de la répétition d'expositions hypoxiques au cours d'un cycle annuel (saison) ou pluriannuel (cycle olympique de quatre ans) sur la performance ont été peu étudiés, tout comme les mécanismes relatifs à la pré-acclimatation et/ou à l'extension des adaptations post-hypoxiques (Mujika, Sharma et Stellingwerff, 2019). Il est également nécessaire de mieux identifier les méthodes hypoxiques susceptibles d'accélérer les adaptations physiologiques et/ou de permettre aux athlètes de maintenir ces adaptations pendant une période plus longue.

Enfin, la combinaison de méthodes hypoxiques avec des exercices plus difficiles (par ex., du travail musculaire excentrique) et/ou l'utilisation de différents facteurs de stress environnementaux (par ex., la chaleur, le froid) sont des pistes prometteuses à explorer. En fonction des exigences spécifiques d'un sport donné et des besoins des athlètes, l'application de différentes méthodes d'entraînement hypoxique pourrait être bénéfique pour l'acclimatation (réduction du temps d'acclimatation, augmentation des charges hypoxiques et/ou d'entraînement tout en limitant l'apparition de la fatigue), pendant – par ex., « vivre en

altitude et s'entraîner au niveau de la mer et en altitude » (LHTLH) (Brocherie *et al.*, 2015) ou son inverse (LHTHL) (Rodriguez *et al.*, 2015) –, après un stage d'entraînement en altitude/hypoxique, ou utilisé indépendamment au cours de la saison. L'utilisation de différents facteurs de stress environnementaux tels que la chaleur, le froid et l'hypoxie semble également intéressante en termes d'effets croisés (transfert de l'adaptation d'un facteur de stress à un autre) (White *et al.*, 2014 ; Gibson *et al.*, 2017), ou d'effets combinés de stress environnementaux (Sotiridis, Debevec et Mekjavic, 2018) ou de stress liés à l'exercice (Dufour *et al.*, 2004). Les questions relatives à ces différents effets croisés ou possibilités de combinaisons méritent d'être examinées.

## Un consortium expérimenté et complémentaire

Pour répondre à ces différents objectifs, le projet HYPOXPERF, porté par le laboratoire Sport, expertise et performance de l'INSEP, s'appuie sur un consortium expérimenté et complémentaire regroupant trois centres d'entraînement membres du réseau Grand INSEP, six universités, une association et une entreprise, qui ont accompagné pas moins de six fédérations (canoë-kayak, cyclisme, judo, lutte, natation et rugby) afin d'optimiser la préparation des athlètes sélectionnés pour les Jeux olympiques et paralympiques de Paris 2024 (Fig. 2).

Le projet HYPOXPERF s'inscrit dans le cadre des missions historiques d'accompagnement de l'INSEP et du réseau Grand INSEP qui visent à disséminer les connaissances et le « savoir-faire » au niveau

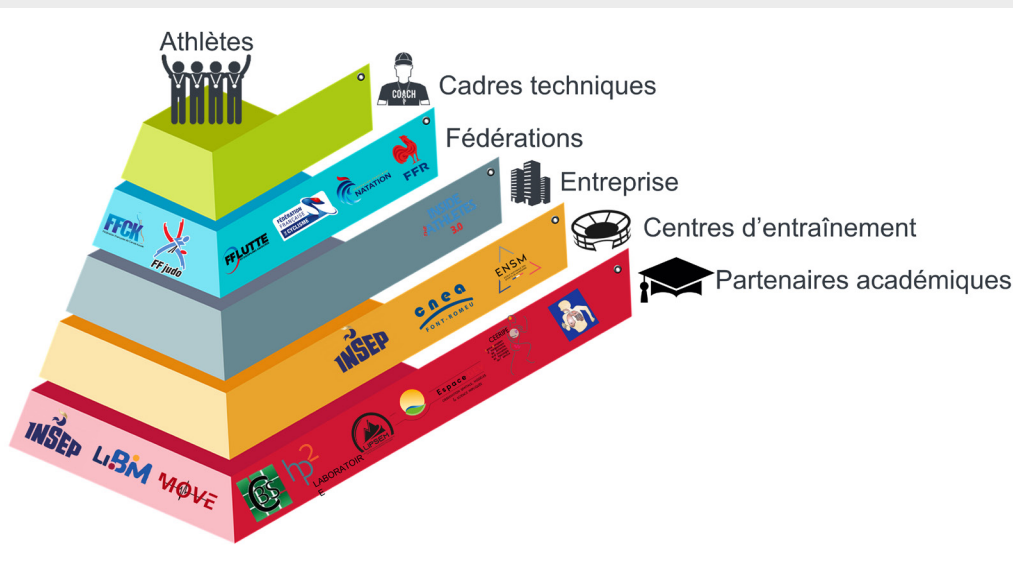


Figure 2 – Consortium du projet HYPOXPERF.

national. L'expertise du consortium repose sur des chercheurs reconnus dans le champ de l'entraînement en altitude/hypoxie et ayant, pour la plupart d'entre eux, plusieurs années d'expérience d'accompagnement scientifique dans des sports individuels et/ou collectifs (par ex., préparation de championnats d'Europe, du monde ou Jeux olympiques). Fort de travaux scientifiques issus d'interactions avec des entraîneurs et menés avec des athlètes de haut niveau (Brocherie *et al.*, 2015 ; Schmitt *et al.*, 2006 ; Woorons *et al.*, 2016 ; Beard *et al.*, 2019), les expérimentations du projet HYPOXPERF ont été co-construites avec les staffs des équipes nationales pour être menées prioritairement en condition « écologique » sur les différents centres d'entraînement et avec les fédérations impliquées.

Sur l'ensemble des lots de travail, la population initialement ciblée est conforme au projet initial même si, parfois, il a fallu pallier des impératifs organisationnels (changement de gouvernance ou d'encadrement technique au sein de certaines fédérations) et calendaires (replanification du calendrier international des compétitions) et élargir le recrutement à des groupes d'athlètes de haut niveau mais non postulants aux Jeux olympiques (catégorie relève) ou issus d'autres fédérations (Fédération française de triathlon dans le WP1) qui ne faisaient pas partie du projet au départ. S'il en ressort un nombre d'athlètes suivis inférieur à l'estimation initiale, le suivi individuel a été amplifié, permettant des mesures répétées sur différents stades, avec un accompagnement personnalisé des sportifs.

Si ces obstacles organisationnels et calendaires comportent des risques de dispersion, ils ont aussi fourni des opportunités d'échange et de communication entre les acteurs scientifiques et sportifs du consortium HYPOXPERF, permettant de faire évoluer les travaux et les modalités des accompagnements scientifiques en adéquation avec les priorités stratégiques identifiées par les fédérations. Par exemple, dans le WP1, 10 athlètes ont bénéficié d'un suivi répété sur plusieurs stages en altitude ou au niveau de la mer. Dans le WP3, l'approche des JO n'a pas permis la reprogrammation d'une phase expérimentale, mais a vu naître une opportunité d'accompagnement dans le cadre de la préparation olympique de l'équipe de France féminine de rugby à 7 avec la reconduction d'un camp d'entraînement préalablement testé dans le cadre du projet HYPOXPERF (Bouten *et al.*, 2023).

## Des résultats nouveaux pour affiner les recommandations

Les résultats préliminaires des différentes études menées dans le cadre du projet HYPOXPERF ont été restitués auprès des entraîneurs et athlètes concernés (bilans personnalisés). La figure 3 résume les principales conclusions. Brièvement :

- Chez des nageurs en eau libre et des triathlètes, un stage en altitude (LHTH) permet d'augmenter la capacité à transporter l'oxygène, avec un maintien de l'expansion de la masse en hémoglobine jusqu'à 10 jours post-stage, en fonction de la dose hypoxique (durée du stage allant de 16 à 28 jours et niveau d'altitude allant de 1 850 m à 3 000 m) et d'autres facteurs

confondants (par ex., supplémentation en fer, acclimatation à la chaleur, âge) influençant les réponses individuelles (résultats qui seront approfondis par les travaux du WP4) (Fig. 3a).

- L'ajout d'un entraînement de répétition de sprints en hypoxie (RSH, 2 séances à 3 500 m par semaine pendant 3 semaines) chez des lutteurs résidant en altitude permet d'améliorer la résistance à la fatigue (test spécifique de lutte) mais pas la capacité aérobie (Fig. 3b).

- L'utilisation d'une surcharge excentrique pendant la récupération d'entraînement aérobie à haute intensité en hypoxie (IHT ; 5 séries de 3 minutes à 100 % de la puissance maximale aérobie (PMA) et 3 minutes de récupération à 30 % ou 150 % PMA) pour compenser la perte de charge mécanique, augmente l'explosivité, la capacité aérobie et la résistance à la fatigue de judokas (Fig. 3c).

- L'application de la méthode RSH avec hypoventilation volontaire (RSH-VHL ; 2 séances par semaine pendant 4 semaines) permet d'améliorer la capacité à répéter des efforts courts et intenses chez des judokas, principalement due à une meilleure perfusion musculaire (Woorons *et al.*, 2024). Cependant, les gains disparaissent 12 jours après l'intervention (Fig. 3d) et des rappels de charge sont certainement nécessaires pour assurer la pérennité des effets positifs.

- Chez des joueuses de rugby à 7, des kayakistes et des cyclistes, la comparaison d'un entraînement de répétitions de sprints en condition hypoxique ou chaude et leurs potentiels effets croisés indique que les deux types d'entraînements induisent des gains significatifs en condition neutre, hypoxique et chaude, suggérant une potentielle

tolérance croisée entre les stress environnementaux (Fig. 3e).

– La combinaison de la méthode LHTLH avec des processus de récupération corps entier par le froid ou la chaleur indique des gains de puissance maximale aérobie, indépendamment du mode de récupération associé chez des cyclistes (Figure 3f).

– Enfin, étant donné son positionnement transversal, le WP4 prévoit, via la création d'une base de données des suivis et tests psychophysiologicals et biologiques communs aux précédents lots de travail, l'identification des variabilités individuelles (bons et mauvais répondeurs à l'hypoxie, dose hypoxique), le ciblage de marqueurs spécifiques (par ex., métabolisme du fer) et la modélisation des facteurs de prédiction des réponses à l'hypoxie.

Sur la base de ces observations, le consortium HYPOXPERF a formulé des recommandations spécifiques aux fédérations impliquées et a divulgué ses résultats lors d'un symposium co-organisé avec le réseau Grand INSEP et le groupe « Accompagnement à la

performance en stress environnemental » (ASTRE) le 3 juillet 2023 à l'INSEP. Ce rapprochement permet entre autres de conforter le modèle d'accompagnement scientifique des athlètes et participe à la structuration et au renforcement de la formation des cadres par l'intermédiaire du Certificat de compétence spécifique (CCS) « Entraînement sous stress environnemental » et des étudiants (par ex., master de l'INSEP). Il a en ce sens également permis la constitution d'un groupe de travail « Supplémentation en fer » au sein du groupe ASTRE avec la présence d'experts du consortium HYPOXPERF.

À ceci s'ajoute différentes initiatives de communication des résultats auprès des différents acteurs sportifs par l'intermédiaire de présentations, ateliers et infographies (séminaire européen « Experianti » organisé par la FFN, Fête de la science en 2023, Journée « Portes ouvertes haute performance » de la FFC, Journées « Extrême » de l'université de Poitiers en 2024) et l'organisation de deux webinaires dans le cadre du GDR Sport & Activité Physique (« Environmental Stress

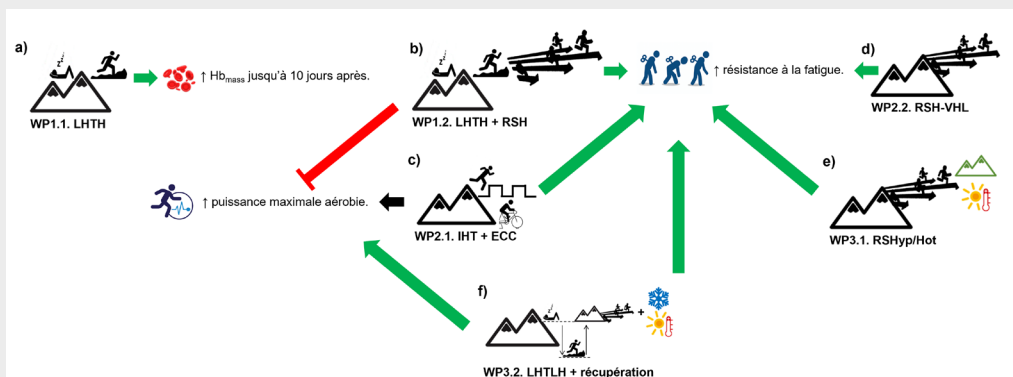


Figure 3 – Résultats préliminaires principaux des différents lots de travail du projet HYPOXPERF.





and Performance », le 23 février 2023, et « Stress environnemental et Santé », le 6 février 2024).

Dans tous les cas, les résultats du projet HYPOXPERF participent à l'amélioration des connaissances scientifiques tout en fournissant des recommandations pratiques pour les entraîneurs et les athlètes qui souhaitent utiliser l'entraînement en altitude/hypoxie dans leur préparation pour les Jeux olympiques.

## Des perspectives pour aller encore plus loin

Comme précédemment mentionné, les retours émanant des expérimentations participent à la mise en place de protocoles d'accompagnement pour certaines fédérations du consortium, avec des transferts possibles pour les fédérations de sports d'hiver (Milano Cortina 2026 et dans les Alpes françaises 2030), dans les sports non

olympiques et paralympiques, ainsi qu'à l'échelle du grand public (santé et bien-être).

En sus des six fédérations actuellement impliquées, la Fédération française de triathlon a intégré le protocole expérimental (WP1.1.) et d'autres fédérations ont émis le souhait d'être accompagnées dans le futur. De nombreux conseils ont été apportés à différentes fédérations (par ex., athlétisme, badminton, haltérophilie, hockey sur gazon, boxe, tir) dans le cadre de la préparation d'événements majeurs en lien direct avec la préparation olympique de Paris 2024. Quelques recommandations ont également été préconisées à des athlètes paralympiques.

L'adhésion des fédérations et les liens forts tissés avec les acteurs fédéraux permettent de faire émerger de nouvelles demandes de suivi, d'accompagnement scientifique et de recherche sur la thématique au profit des populations d'athlètes de haut niveau mais aussi vers la population générale (apport du stress environnemental pour lutter contre certaines pathologies métaboliques ou cardiovasculaires, le vieillissement, etc.) en lien direct avec les initiatives gouvernementales, comme « **Bouger 30 min** », stratégie Nationale Sport Santé.

L'émergence d'outils « environnementaux » sur le territoire français avec un maillage par l'intermédiaire du réseau Grand INSEP et le groupe ASTRE, le nombre grandissant d'entraîneurs sensibilisés à l'utilisation des stress environnementaux dans l'entraînement, les échanges et réflexions avec les entraîneurs et athlètes suivis au cours du projet HYPOXPERF ont permis de réduire le « fossé entre terrain et laboratoire », ouvrant de nouvelles opportunités scientifiques qu'il serait nécessaire de prolonger et

dont les retombées pourraient aller au-delà du milieu sportif.



[Voir la vidéo de présentation du projet.](#)

## Bibliographie

- Beard, A., Ashby, J., Chambers, R., Brocherie, F. et Millet, G. P. (2019). Repeated-sprint training in hypoxia in international rugby union players. *Int J Sports Physiol Perform*, 14(6), 850-854. <https://doi.org/10.1123/ijssp.2018-0170>
- Bouten, J., Brick, M., Saboua, A., Hadjadj, J. L., Piscione, J., Margot, C. *et al.* (2023). Effects of 2 different protocols of repeated-sprint training in hypoxia in elite female rugby sevens players during an altitude training camp. *Int J Sports Physiol Perform*, 18(9), 953-959. <https://doi.org/10.1123/ijssp.2023-0121>
- Brocherie, F., Girard, O. et Millet, G. P. (2017). Innover en préparation physique avec l'entraînement en altitude. *Réflexions Sport*, 15, 4-23.
- Brocherie, F., Millet, G. P., Hauser, A., Steiner, T., Rysman, J., Wehrli, J. P. *et al.* (2015). "Live High-Train Low and High" hypoxic training improves team-sport performance. *Med Sci Sports Exerc*,

47(10), 2140-2149. <https://doi.org/10.1249/mss.0000000000000630>

Burtscher, J., Raberin, A., Brocherie, F., Malatesta, D., Manferdelli, G., Citherlet, T. *et al.* (2023). Recommendations for women in mountain sports and hypoxia training/conditioning. *Sports Med*, 54, 795-811. <https://doi.org/10.1007/s40279-023-01970-6>.

Dufour, S. P., Lampert, E., Doutreleau, S., Lonsdorfer-Wolf, E., Billat, V. L., Piquard, F. *et al.* (2004). Eccentric cycle exercise: training application of specific circulatory adjustments. *Med Sci Sports Exerc*, 36(11), 1900-1906. <https://doi.org/10.1249/01.mss.0000145441.80209.66>

Gibson, O. R., Taylor, L., Watt, P. W. *et al.* Maxwell, N. S. (2017). Cross-adaptation: heat and cold adaptation to improve physiological and cellular responses to hypoxia. *Sports Med*, 47(9), 1751-1768. <https://doi.org/10.1007/s40279-017-0717-z>

Jeton, F., Soliz, J., Marchant, D., Joseph, V., Richalet, J. P., Pichon, A. *et al.* (2017). Increased ventilation in female erythropoietin-deficient mouse line is not progesterone and estrous stage-dependent. *Respir Physiol Neurobiol*, 245, 98-104. <https://doi.org/10.1016/j.resp.2017.07.002>

Millet, G. P. *et al.* Brocherie, F. (2020). Hypoxic training is beneficial in elite athletes. *Med Sci Sports Exerc*, 52(2), 515-518. <https://doi.org/10.1249/MSS.0000000000002142>

Mujika, I., Sharma, A. P. *et al.* Stellingwerff, T. (2019). Contemporary periodization of altitude training for elite endurance athletes: a narrative review. *Sports Med*, 49(11), 1651-1669.

Raberin, A., Burtscher, J., Citherlet, T., Manferdelli, G., Krumm, B., Bourdillon, N. *et al.* (2023). Women at altitude: sex-related physiological responses to exercise in hypoxia. *Sports Med*, 54, 271-287. <https://doi.org/10.1007/s40279-023-01954-6>

Rodriguez, F. A., Iglesias, X., Feriche, B., Calderon-Soto, C., Chaverri, D., Wachsmuth, N. B. *et al.* (2015). Altitude training in elite swimmers for sea level performance (Altitude Project). *Med Sci Sports Exerc*, 47(9), 1965-1978. <https://doi.org/10.1249/MSS.0000000000000626>

Schmitt, L., Millet, G., Robach, P., Nicolet, G., Brugniaux, J. V., Fouillot, J. P. *et al.* (2006). Influence of "living high-training low" on aerobic performance and economy of work in elite athletes. *Eur J Appl Physiol*, 97(5), 627-636. <https://doi.org/10.1007/s00421-006-0228-3>

Siebenmann, C. *et al.* Dempsey, J. A. (2020). Hypoxic training is not beneficial in elite athletes. *Med Sci Sports Exerc*. 52(2), 519-522. <https://doi.org/10.1249/MSS.0000000000002141>

Sotiriadis, A., Debevec, T. *et al.* Mekjavic, I. B. (2018). Letter to the editor: combined effects of hypoxia and heat: importance of hypoxic dose. *Am J Physiol Regul Integr Comp Physiol*, 314(2), R228-R229. <https://doi.org/10.1152/ajpregu.00347.2017>

White, A. C., Salgado, R. M., Schneider, S., Loeppky, J. A., Astorino, T. A. *et al.* Mermier, C. M. (2014). Does heat acclimation improve exercise capacity at altitude? a cross-tolerance model. *Int J Sports Med*, 35(12), 975-981. <https://doi.org/10.1055/s-0034-1368724>

Woorons, X., Mucci, P., Richalet, J. P. *et al.* Pichon, A. (2016). Hypoventilation training at supramaximal intensity improves swimming performance. *Med Sci Sports Exerc*, 48(6), 1119-1128. <https://doi.org/10.1249/MSS.0000000000000863>

Woorons, X., Faucher, C., Dufour, S. P., Brocherie, F., Robach, P., Connes, P., Brugniaux, J. V., Verges, S., Gaston, A. F., Millet, G. P., Dupuy, O. *et al.* Pichon, A. (2024). Hypoventilation training including maximal end-expiratory breath holding improves the ability to repeat high-intensity efforts in elite judo athletes. *Front. Physiol*, 15, 1441696. <https://doi.org/10.3389/fphys.2024.1441696>