

# Mission « Capsule » Under The Pole : une nouvelle approche de la plongée en saturation à faible profondeur au mélange HélioX sur l'île de Moorea

## Under The Pole III : Ghislain Bardout et Emmanuelle Périé-Bardout

### Equipe médicale et physiologique :

Bernard Gardette (PhD Marseille)

Julien Hugon (PhD Marseille)

François Guerrero (Prof PhD, UBO)

Emmanuel Dugrenot (Doct UBO, Tek Diving)

Emmanuel Gouin (MD, UTP)

Jean-Eric Blatteau (Prof MD, PhD, SSA)



# Under The Pole I

45 jours en traineau sur la banquise en 2010

52 plongées / 8 équipiers



# Under The Pole II

2014-2015

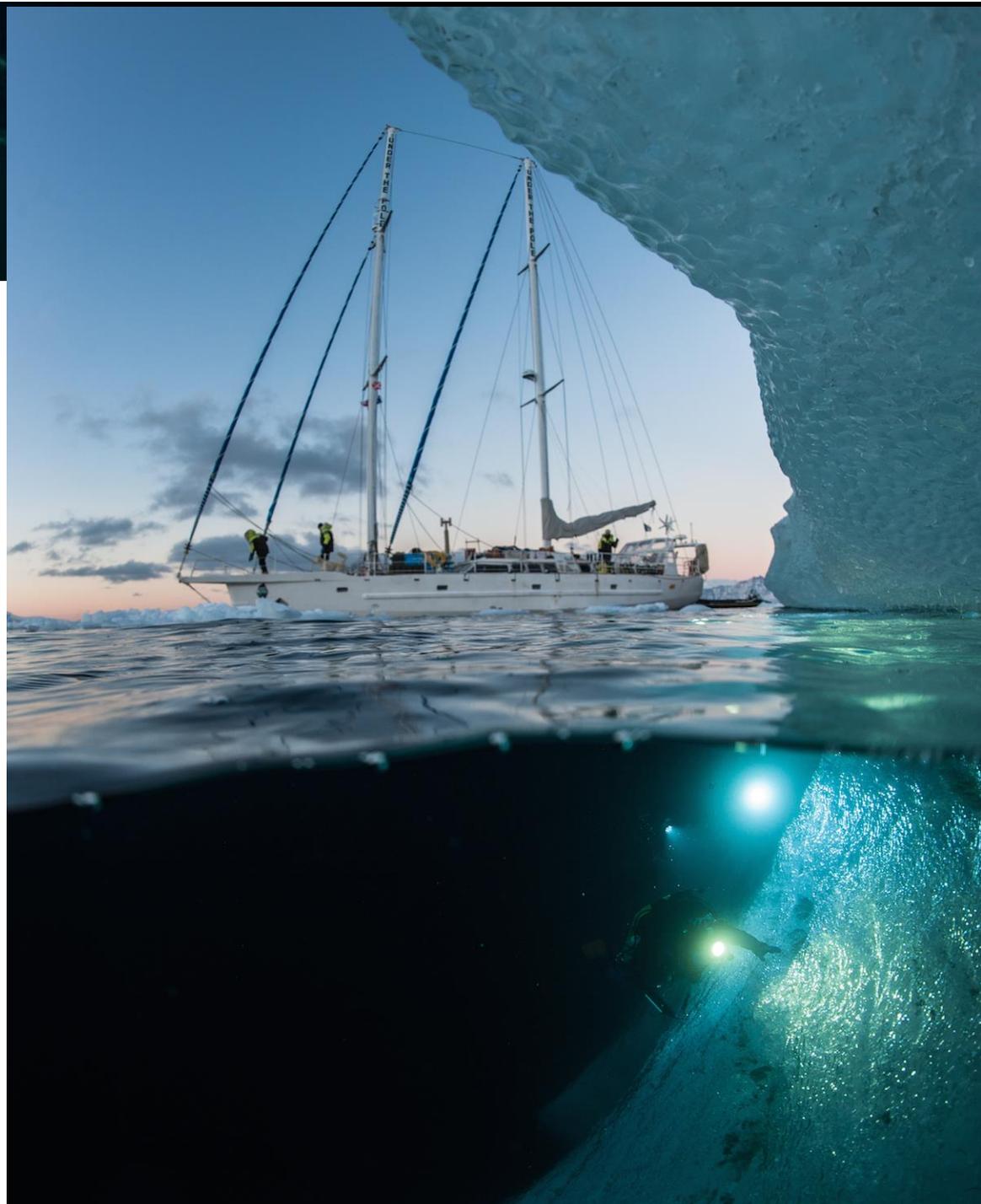
Goélette polaire

Groenland

21 mois

300 plongées

55 équipiers



# Under The Pole III

- De 2017 à 2021, pendant 4 ans, une équipe de plongeurs et de scientifiques vont parcourir le monde à bord de la goélette polaire WHY, de l'Arctique à l'Antarctique, en passant par le Pacifique et l'Atlantique.
- **Leur objectif :**
  - étudier le milieu sous-marin (étude des coraux profonds) entre la surface et 170 m de profondeur
  - développer de nouvelles techniques de plongée, pour prolonger la durée d'observation scientifique.



# PLAN

- La plongée à saturation
- Des maisons sous la mer à la plongée par systèmes
- Description du concept « capsule »
- Rappel des procédures professionnelles
- Innovations du programme capsule
- Mesures de sécurité
- Tolérance physiologique
- Premiers résultats

# La plongée « en saturation »

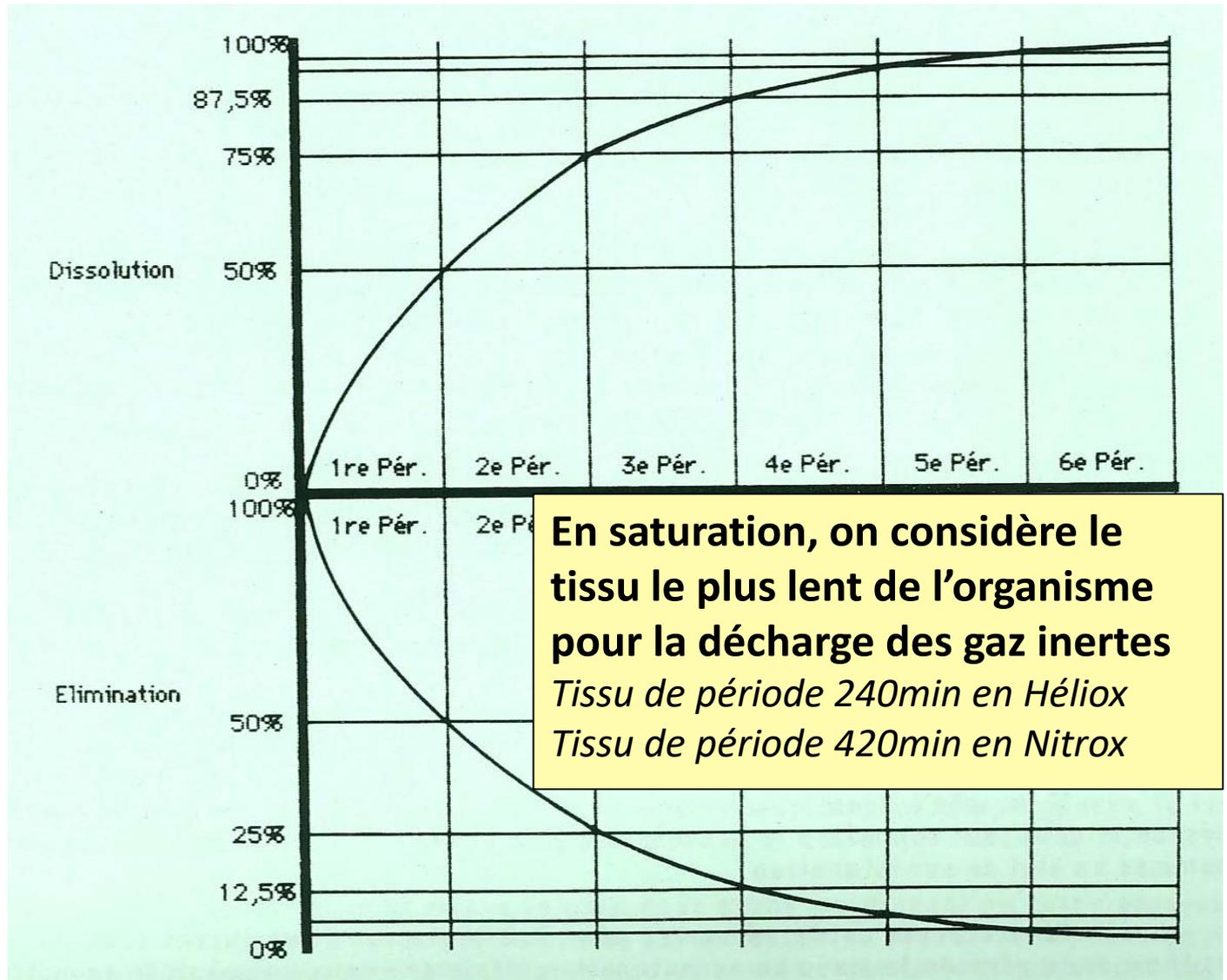
- La plongée en saturation permet de travailler pendant de longues périodes sous l'eau.
- Les "**tissus**" du corps du plongeur sont **saturés** par l'azote, si l'air est utilisé, ou de l'hélium si c'est l'héliox
- *L'avantage est qu'il ne va y avoir **qu'une seule décompression** pour des dizaines de plongées, donc moins de risque d'accident de décompression : un plongeur qui passe 8h à 100 m aura le même temps de décompression que s'il y passe 6 jours !*
- Les plongeurs peuvent travailler des jours, voire des semaines en étant constamment sous pression.

# Décompression pour la plongée « en saturation »

**Charge et décharge en gaz inerte d'un tissu de Période T**

$$T = \log 2 / K$$

temps pendant lequel sa valeur double ou diminue de moitié



# LES MAISONS SOUS LA MER...



Robert Stenuit 1962



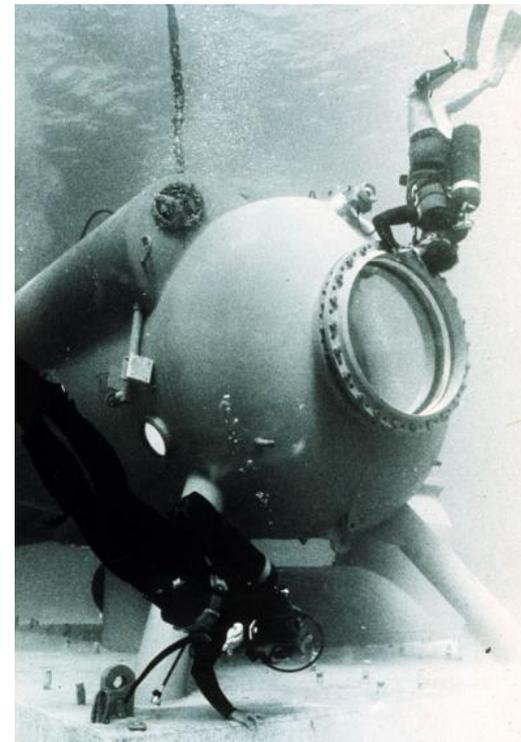
Précontinent 1 1962

*« C'est de l'océan  
que naîtra le destin  
des civilisations à venir »  
Jacques ROUGERIE*



Aquabulle 1972

Hydrolab NOAA 1972



# LA PLONGÉE « PAR SYSTÈMES »

- Depuis l'abandon des maisons sous la mer dans les années 80, les compagnies pétrolières ont développé **la plongée « par systèmes »**.
- Les plongeurs ne vivent plus sous l'eau mais dans des **caissons sur le pont des navires**.
- Ces caissons restent à la même pression que la pression du lieu de travail sur le fond.
- Pour travailler ils sont amenés au fond par la **tourelle** de plongée, une sorte d'ascenseur.
- Système **très lourd** à mettre en place, **très onéreux**



alamy stock photo

1977766  
www.alamy.com



alamy stock photo

188270  
www.alamy.com



alamy stock photo

CNGRA4  
www.alamy.com

# Origine du concept « capsule »

- *Renouer avec le concept des « **maisons sous la mer** » débuté en 1962 : Man in the sea / Edwin Link et Précontinent / Jacques-Yves Cousteau*
- ***Objectif : rester longtemps sous l'eau pour observer***
- Réunion préliminaire en juin 2017 : Bernard Gardette, Julien Hugon et Jean-Eric Blatteau avec Ghislain Bardout
- ***Quelle profondeur ? Quel gaz ? Quelle décompression ?***
- *Choix de se rapprocher des procédures connues et sûres*

# LES CHOIX

- **Quel gaz ?**

*Hélium*

*décompression deux fois plus rapide que l'azote*

- **Quelle décompression ?**

*Se rapprocher des procédures éprouvées (ex tables MT)*

- **Quelle profondeur ?**

*Pouvoir réaliser la décompression en eau*

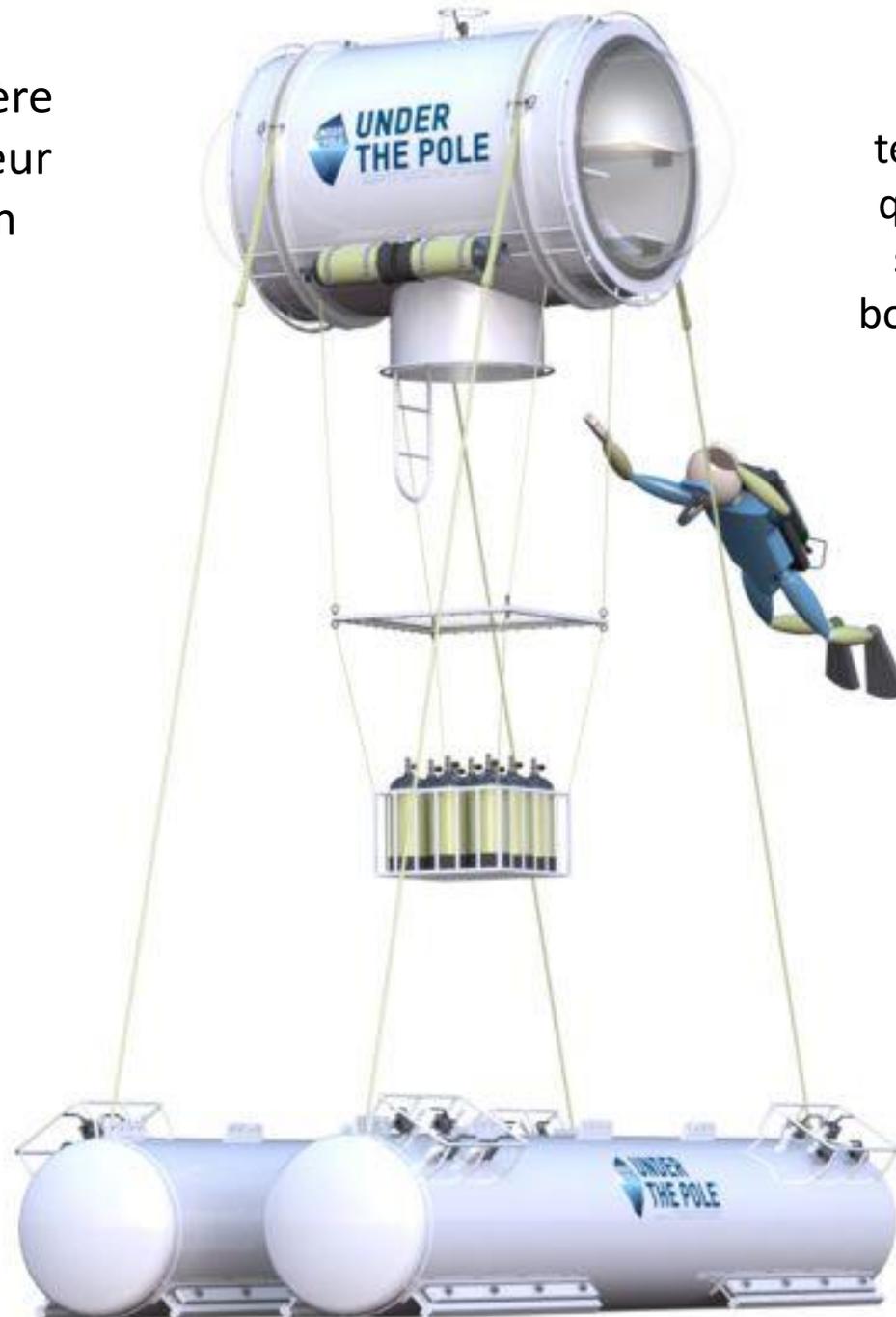
*et sans moyen extérieur*

*Cible < 20m*

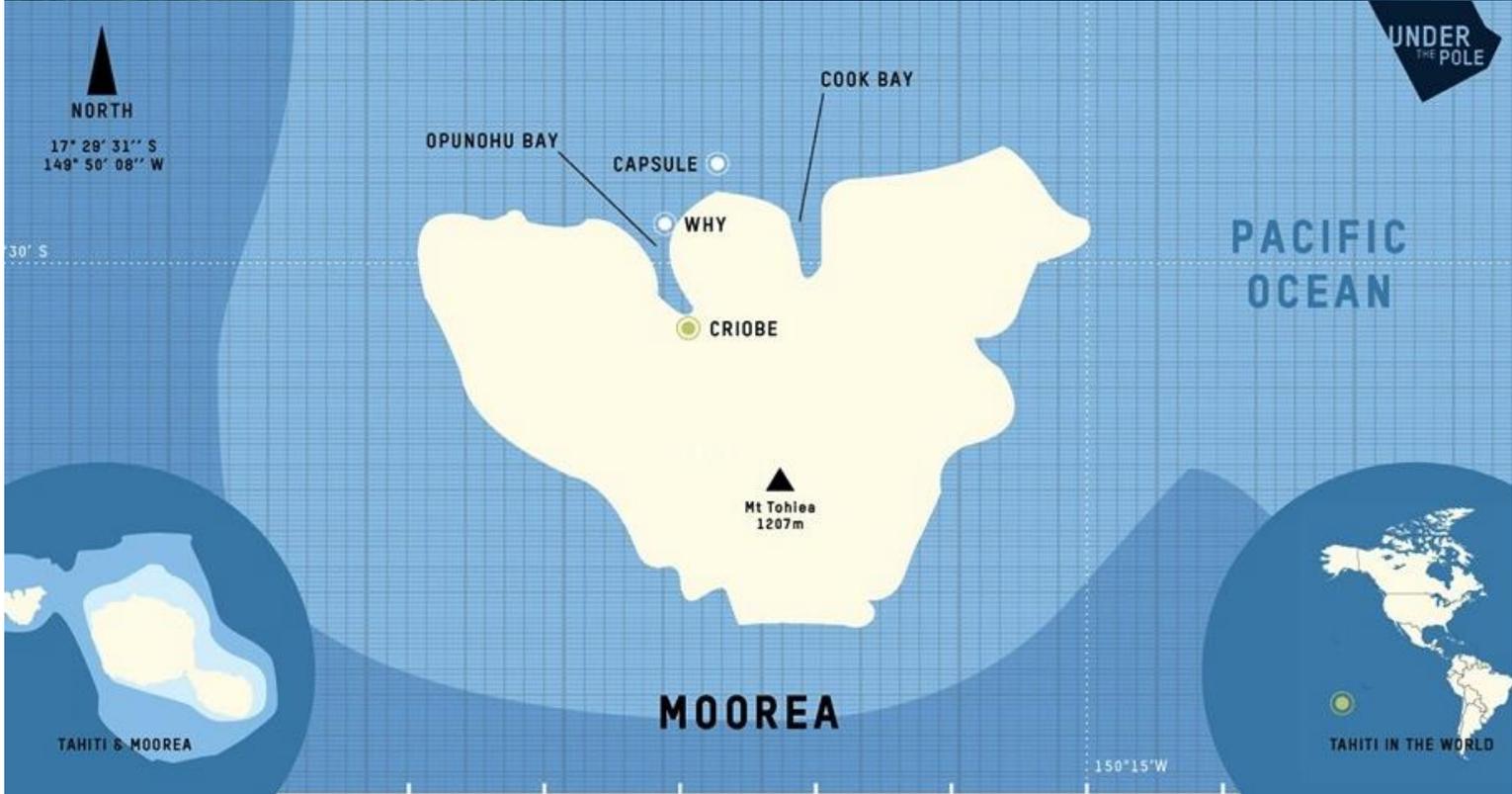
# Capsule - description

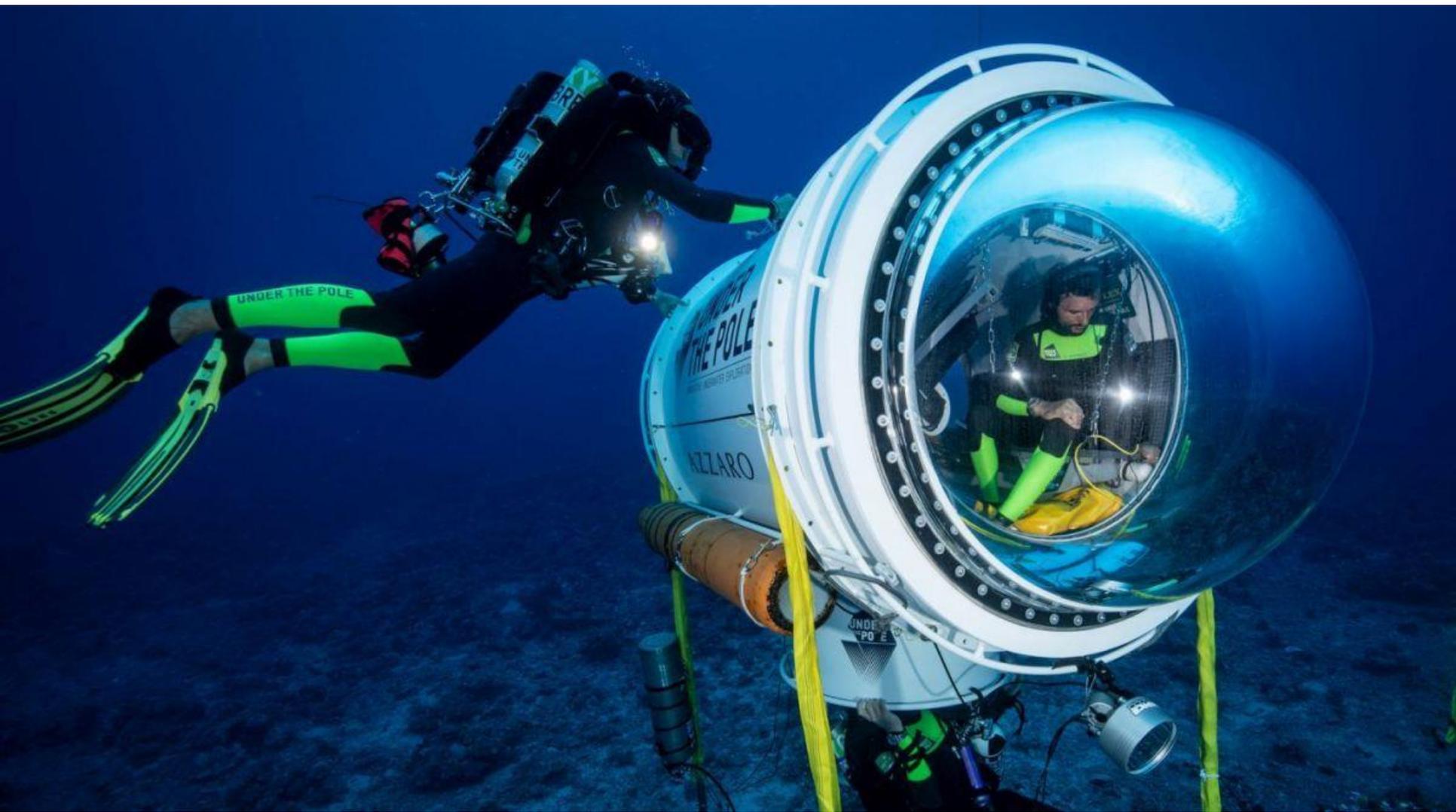
- Habitat sous-marin
- **Simple, léger, autonome et peu encombrant**
- **Facilement transportable (container)**
- Destiné à accueillir 2 voire 3 plongeurs
- Missions dédiées à la connaissance du milieu sous-marin
- **Permettre des durées d'observation prolongée +++**
- Partenariat scientifique de biologie marine CRIOBE Moorea

Gestion de l'atmosphère  
: similaire à un recycleur  
(contrôle et injection  
O<sub>2</sub>, chaux sodée...)



Système de  
télécommunication  
qui relie l'habitable  
sous-marin à une  
bouée en surface qui  
envoie les  
informations







# Saturation professionnelle MT92 HélioX (issue de l'expérience Comex)

- Habituellement « sat » réalisées dans la zone des 100m (mer du Nord, Afrique de l'ouest)
- Tables jusqu'à 200m avec MT92 (335m pour Comex Brésil en travail de routine)
- Très grande sécurité : très peu d'accident
- *Faible profondeur : peu utilisée, exemple d'un chantier en Terre de feu zone de travail entre 10 et 40m*

# Sat pro MT92 HélioX

## Rappel des principes – Niveau vie

- Niveau vie : 400mb (ex 20m: HélioX 13,3%)
- Normalement toujours présence d'azote à 800mb (caisson non rincé avant la MEP)
- Contrôle permanent atmosphère (O<sub>2</sub>, CO<sub>2</sub>, CO)
- Température : 26-28°C
- Hygrométrie relative : 40-60%
- Repos

# Sat pro MT92 HélioX

## Principes - Excursions

- Excursion à PO<sub>2</sub> 400-600mb relié avec « **ombilical** »
- Durée max (à prof max): 6h/j (travail intense possible)
- Excursion descendante standard :
  - *Exemple niveau vie 20m : delta de 7m soit 27m prof*
    - Possibilité démarrer déco finale après excursion standard
  - Possibilité d'excursion « exceptionnelle » : delta 14m (34m)
    - Dans ce cas, respect de 12h au niveau vie avant la déco finale
- Excursion ascendante standard :
  - *Exemple niveau vie à 20m : delta de 7m soit 13m prof*
    - Pas d'excursion « exceptionnelle » autorisée

# Sat pro MT92 HélioX

## Principes - décompression finale

- Remontée linéaire quelle que soit la profondeur
- Avant la déco finale, passage à PO2 500mb
- 2 vitesses constantes de remontée :
- 1ere vitesse jusqu'à 15m :
  - 50min/m (500mb) ou 45min/m (600mb)
- 2<sup>ème</sup> vitesse de 15m à la surface :
  - 60min/m (FO2 21% à 24%)
- **Durée Déco de 20m = 20 heures**

# Description du concept « capsule »

- Niveau vie 20m PO<sub>2</sub> 400mb HélioX (pas d'azote)
- PO<sub>2</sub> régulée, CO<sub>2</sub> absorbé
- Contrôle permanent O<sub>2</sub>, CO<sub>2</sub>
- Température : 28-30°C
- Hygrométrie relative : 80-90%
- Confort cible : 2 personnes max
  - Testé à 3 personnes dans 4,5m<sup>3</sup> (espace vital environ 5X plus confiné qu'en pro)

# Contrôle de la capsule



# Innovation capsule - Excursion

- Excursion à **PO2 1300mb et en recycleur**
- Excursion descendante standard :
  - standard : delta de 15m (35m prof)
  - respect de 3h au niveau vie avant la déco finale
  - **« exceptionnelle » : delta 21m (41m max)**
  - respect de 6h au niveau vie avant la déco finale
- Excursion ascendante standard :
  - Pour capsule : delta de 5m (15m prof)

# Innovation capsule – Excursions

## *optimiser la « fenêtre O2 »*

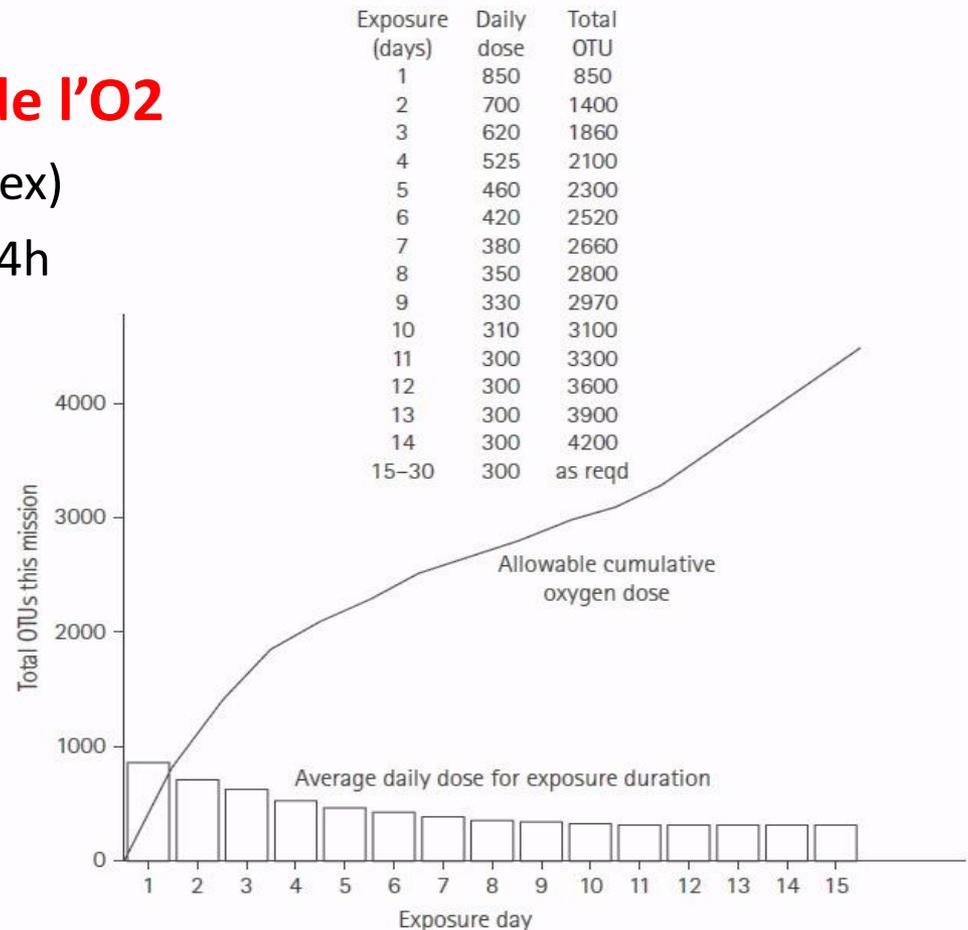
**Principe : augmenter la PO2 pour diminuer le temps de déco**

*La vitesse de décompression étant inversement proportionnelle à la PO2 (Vann)*

### Eviter la toxicité pulmonaire de l'O2

- Méthode du calcul des OTU (Repex)
- Seuils autorisés par période de 24h

Appliqué à capsule :  
***18h d'excursions sur 3j  
avec Déco finale en 5h***  
(PO2 1300mb)



# Innovation capsule – Déco finale

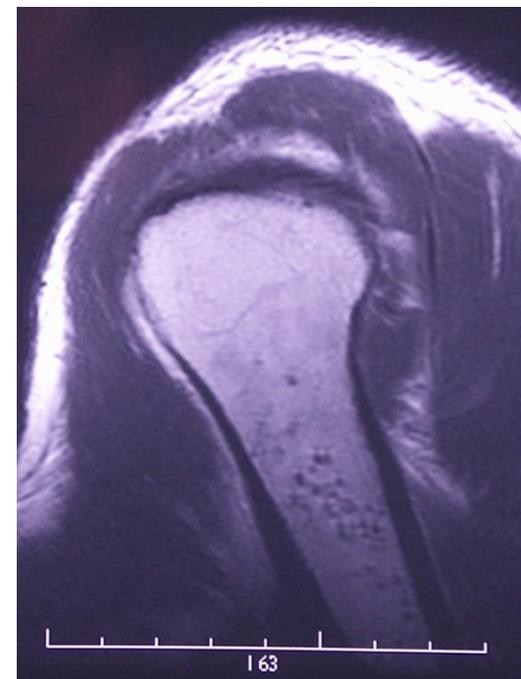
- Concept de **pré-oxygénation** dans la capsule : au sec, en recycleur (avec pince-nez)
- **2h** dans la capsule à PO2 1300mb
- **2h 5min** dans l'eau à PO2 1300mb :  
Paliers de 25min à 15m, 12m, 9m, 6m et 3m

# Mesures de sécurité en cas d'accident

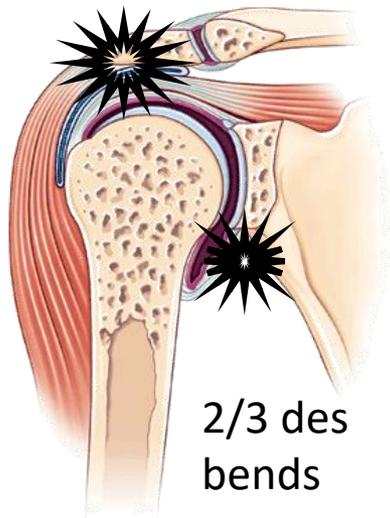
- Il existe un risque faible d'accident de décompression (ADD) lors de plongée en « saturation »
- Surtout ADD de type *bend* (douleur articulaire) et parfois de type vestibulaire (vertiges rotatoires et vomissements)

# ADD ostéo-articulaires / BENDS

Décompression



Tissus péri-articulaires



2/3 des  
bends

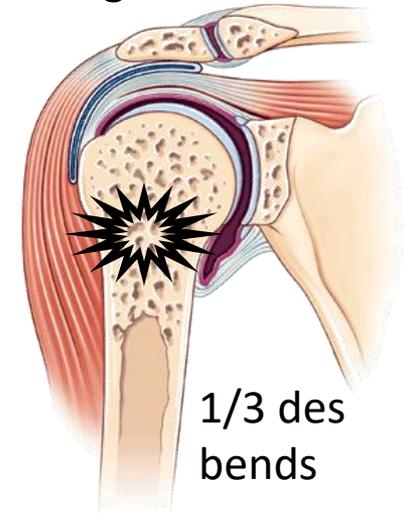
compression  
distension  
dilacération

dilatation / compression  
cap. veineux sinusoides  
↗ P° intra-médullaire

Stimulation des terminaisons  
nerveuses sensibles à l'étirement

**DOULEUR !**

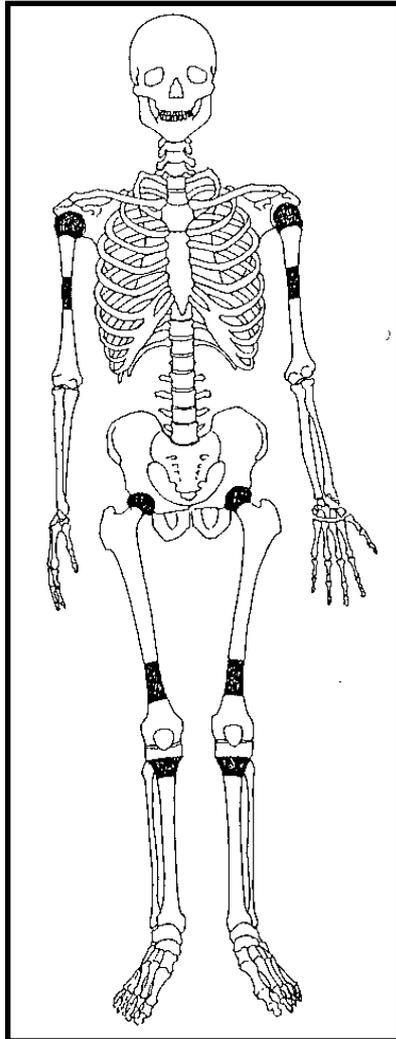
Moelle osseuse  
riche en graisse



1/3 des  
bends

risque d'ostéonécrose !

# OSTEONECROSE DYSBARIQUE



Localisation :  
*souvent bilaterale*  
Genoux  
Epaules, Humérus  
Têtes fémorales

# Mesures de sécurité en cas d'accident

## Principes du traitement dans la capsule :

- augmenter la PO<sub>2</sub> jusqu'à **2,8 ATA** sur recycleur en fonction des symptômes en mode séquentiel (25min-5min en ambiance-25min) pendant 1 à 2h
- Intervention médicale possible dans la capsule avec tt complémentaires
- Déco finale en eau sur recycleur à **1,9 ATA**
- Masques faciaux disponibles sur une ligne de déco de secours alimenté en Hélio<sub>x</sub>

# Mesures de sécurité en cas d'accident

- **4 scénarii possibles**

- ADD au cours d'une excursion : passage à 1,6 ATA en eau puis prise en charge capsule (cf)
- ADD au retour d'une excursion : prise en charge capsule (cf)
- ADD pendant la déco finale en eau : passage à 1,9 ATA, avec possibilité de redescendre de 3m plus profond pendant 1h (effet recompression)
- ADD au décours de la sat : PEC « classique », EVASAN vers caisson Papeete

# Mesures de sécurité en cas d'accident

- Surveillance visuelle et audio permanente avec la capsule
- En permanence équipe de plongeurs de secours + médecin
- Médicalisation sur site par médecin plongeur
- Contact 15 EVASAN par hélico
- Proximité caisson Papeete (15min de vol)
- Hélicsurface à proximité de la base logistique
- Pompiers et Hôpital de proximité sur Moorea (pas de SMUR)

# Tolérance physiologique

<b>Fonction physio</b>	<b>Mesure</b>	<b>Protocole</b>
Bulles circulantes	Doppler	Détecteur Azoth system
Microcirculation (réactivité endothéliale et non-endothéliale)	Debitmétrie laser Doppler (cutané)	Périmed PF5000, avec iontophorèse acétylcholine puis de nitroprussiate de sodium
Fonction pulmonaire	Spirométrie: boucle débit volume	Spirobank II
Fonction cardiaque	Enregistrement ECG	Holter Spiderview ; enregistrement 15 minutes allongé au repos. Essentiellement pour l'analyse de la variabilité cardiaque
Equilibre hydrominéral	Analyse des ions dans l'urine	Recueil d'urine.
Génétique	Expression des gènes (principalement ceux de la réponse au stress)	Analyse des ARNm sur des cellules recueillies par frottis intérieur de la joue
Microbiote intestinal		Recueil féces sur kit DNAgenotek
Humeur (psycho)	Questionnaire PANAS	
Fatigue psy	Flicker	
Déshydratation	Hématocrite	Goutte de sang au doigt
anthropométrie	Masse corporelle	Pèse personne
Composition corporelle	Impédancemétrie	



# Premiers résultats

- 1 essai de 24h pour 3 sujets *avec déco finale en eau (5h à PO2 1300mb)* : tolérance modérée avec froid et déshydratation...
- 3 premières sat de 3j avec 3 sujets différents (dont 1 femme) *avec déco finale de 2h en eau précédée de 2h de preO2 dans la capsule.*
- 3 nouvelles sat de 3j avec 2 sujets
- Poursuite en cours jusqu'à mi-novembre
- Intégration de biologistes plongeurs du CRIOBE

# Premiers résultats

- Actuellement 9 sujets différents (1 femme)
- Age : 27-61 ans
- Très bon ressenti
- Sommeil « léger » avec rêves ++
- Fonction respiratoire non altérée (EFR)
- **Bonne tolérance de la décompression :**
  - Faibles niveaux de bulles mesurés (majorité de grades I)
  - Toujours inférieurs à un grade III (grade III = témoin d'un stress décompression significatif)

# Premiers résultats

- A noter lors des tests d'orthostatisme (15min debout après 15min couché) :
  - La plupart des sujets avec tachycardie orthostatique posturale (POTS) : ex FC à 130 bien toléré
  - 1 sujet avec baisse PA de 30 mmHg avec malaise
- Dérèglement de la balance sympathique ?
  - ***Hypothèse d'un syndrome de déconditionnement lié au manque d'activité physique dans la capsule***

# Tolérance physiologique

- Résultats complets à venir
- En attente de *dépouillement*
- *Equipe du Pr Guerrero UBO Brest*
- Prochaine réunion MEDSUBHYP à Besançon

# Conclusions

- Capsule = habitacle sous marin innovant
  - Transportable, léger, sécurisé, fiable
- Procédures de plongée et déco. innovantes
  - Extrapolées des connaissances acquises sur les maisons sous la mer et des procédures professionnelles
- Outil exceptionnel pour observer la faune sous-marine



