

Le GERM

Groupement d'Etudes de Résonance Magnétique

(association loi 1901, depuis 1988)



But: rassembler la communauté, du public comme du milieu industriel, pour suivre les développements récents en **RMN, IRM et RPE** dans toute leur diversité.

Bureau: 10 chercheur·ses/ingénieur·es



Prochain congrès (« Grand GERM »): 2-6 juin 2025 à Autrans (Isère)



Le groupe de travail « Hélium »: Objectifs

- Initier une action collective nationale d'échange avec des « experts »
- Produire une présentation et un document synthétique de solutions de recyclage/reliquéfaction et leurs avantages/inconvénients
- Mettre à disposition des ressources utiles et des plateformes d'échange

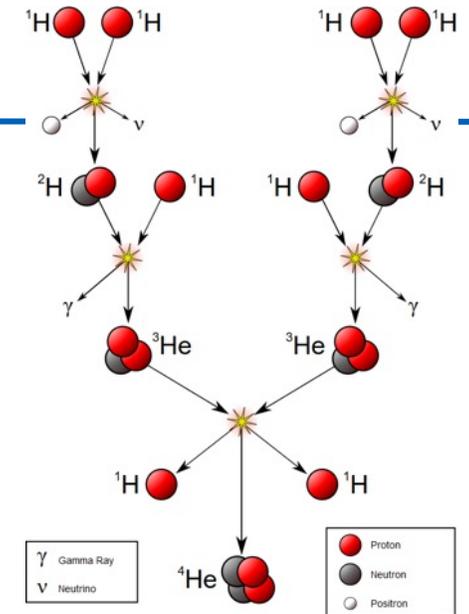
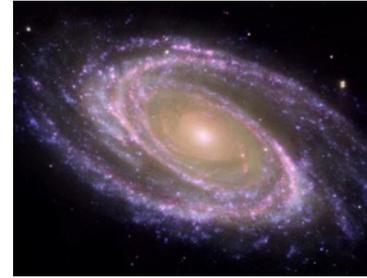
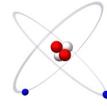
Le groupe de travail « experts »

	Nom	Prénom	Labo	Ville	email	LinkedIn	X (Twitter)
RMN	BERNARD	Aurélie	CEISAM	Nantes	ceisam_staff_rmn@univ-nantes.fr	lien	
	SILVESTRE	Virginie	CEISAM	Nantes	ceisam_staff_rmn@univ-nantes.fr		
	GAVEAU	Philippe	ICGM	Montpellier	philippe.gaveau@umontpellier.fr	lien	
	PAGES	Guilhem	AgroResonance	Theix (GERM)	guilhem.pages@inrae.fr	lien	
	LAURENT	Guillaume	LCMCP	Paris (GERM)	guillaume.laurent@sorbonne-universite.fr	lien	@GuL916
	GIRAUD	François	ICSN	Gif-sur-Yvette	francois.giraud@cnrs.fr	lien	
	TREBOSC	Julien	IMEC	Villeneuve-d'Ascq	julien.trebosc@univ-lille.fr		
	ROILAND	Claire	ISCR	Rennes	claire.roiland@cnrs.fr	lien	
	MORVAN	Estelle	IECB	Bordeaux	e.morvan@iecb.u-bordeaux.fr		
	PEYRIGA	Lindsay	TBI	Toulouse	lindsay.Peyriga@insa-toulouse.fr		@Lindsay_Peyriga
Cryogénie	GUILHOT	Johan	Institut Néel	Grenoble	johan.guilhot@neel.cnrs.fr		
	RONAYETTE	Luc	LNCMI	Grenoble	luc.ronayette@lncmi.cnrs.fr		

Hélium 4 - Origine

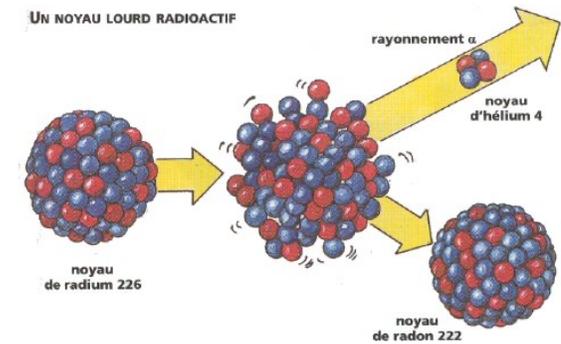
Espace

- Produit par fusion de l'hydrogène dans les étoiles
- Second atome le plus répandu : 74 % H₂ , 24 % He , 2 % autres éléments
- Découvert en 1868 par Jules Janssen en observant le soleil lors d'une éclipse



Terre

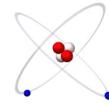
- Produit dans le sol par la radioactivité α : $\alpha + 2 e^- \rightarrow {}^4\text{He}$
- Découvert en 1895 par Sir William Ramsay dans de la pechblende
- Traverse la croûte terrestre : 5,2 ppm He dans l'atmosphère
- Quitte l'atmosphère terrestre au bout de ~ 1 million d'années
- Production estimée : $\sim 17.10^6$ m³ / an
- **Une petite partie est piégée dans le sol dans des poches très étanches en mélange avec le gaz naturel. Premier gisement identifié : 1903 Denver, Colorado, USA**



USA

- Premier et seul pays producteur d'hélium jusque dans les années 1960

Hélium 4 – Stockage et déstockage

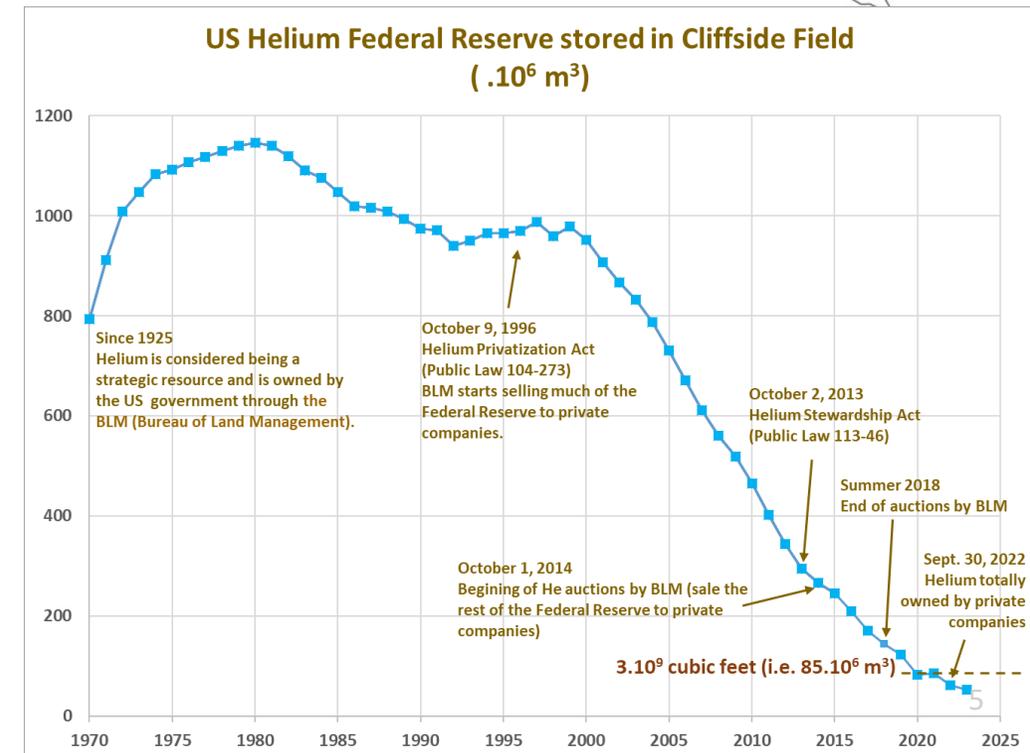
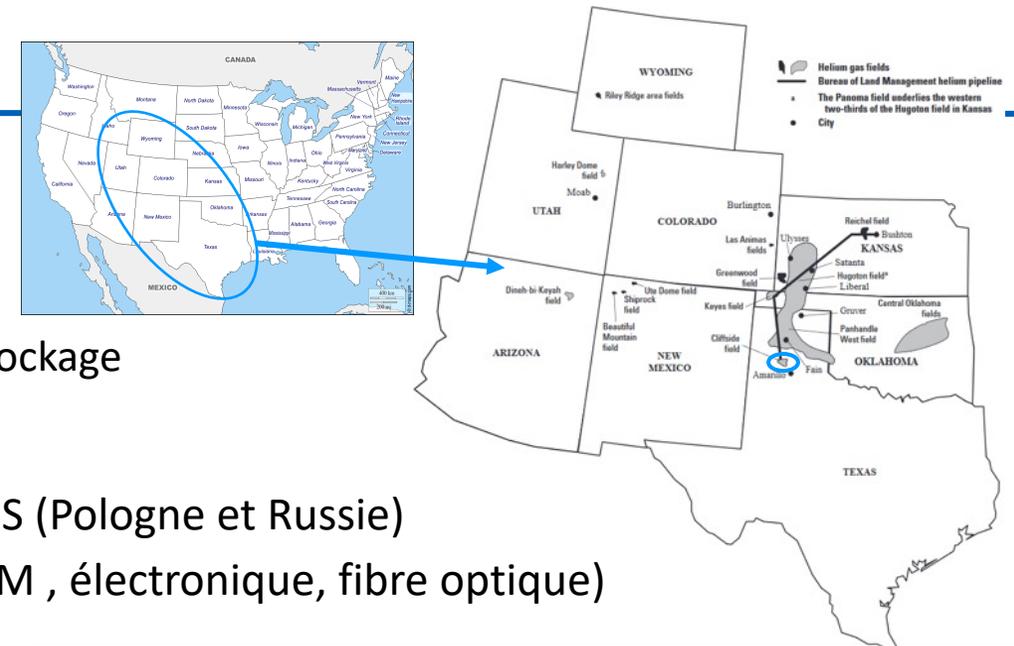


USA

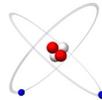
- 1925 : politique de conservation initiée à Cliffside Field
Si extraction > besoin → stockage. Si extraction < besoin → déstockage

Monde

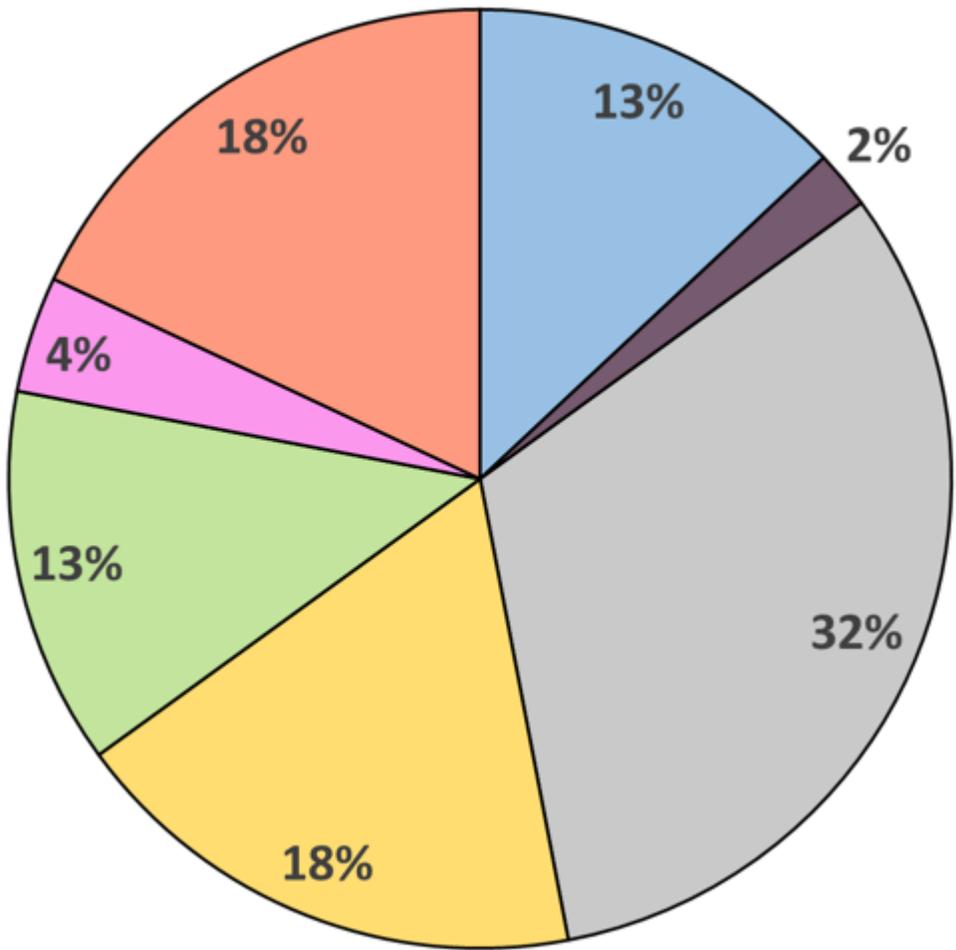
- Années 1960 : début extraction He ailleurs qu'aux USA : en URSS (Pologne et Russie)
- A partir des années 1980 : croissance rapide de la demande (IRM , électronique, fibre optique)
Vente He en 1980 : 37.10^6 m^3 , en 1999 : 149.10^6 m^3
- 1995 : début production en Algérie
- A partir des années 2000 :
 $\sum \text{demandes} > \sum \text{capacités de production de 15 à 20 \%}$
→ fort déstockage de Cliffside Field
- 2008 : début production au Qatar
- 2013 : début production en Australie
- 2017 : début production au Canada
- 2023 : début production en Afrique du Sud



Hélium 4 – Principales utilisations



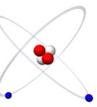
Distribution of helium consumption worldwide



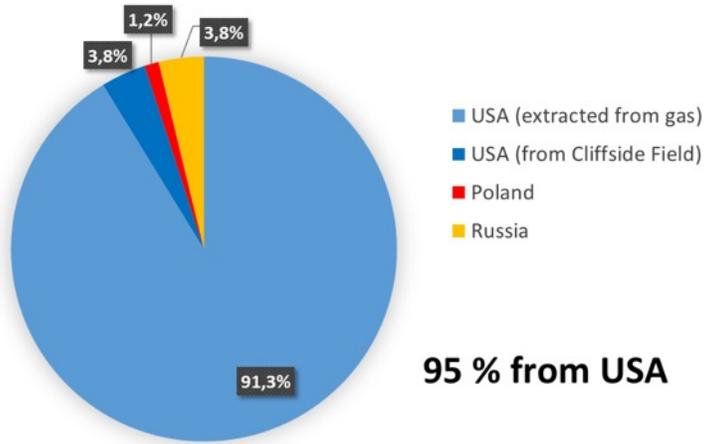
- Science, engineering, spatial
- Diving
- Magnetic resonance imaging
- Fibers, semiconductors
- Welding
- Leak detection
- Lifting gas



Hélium 4 – Evolution du marché

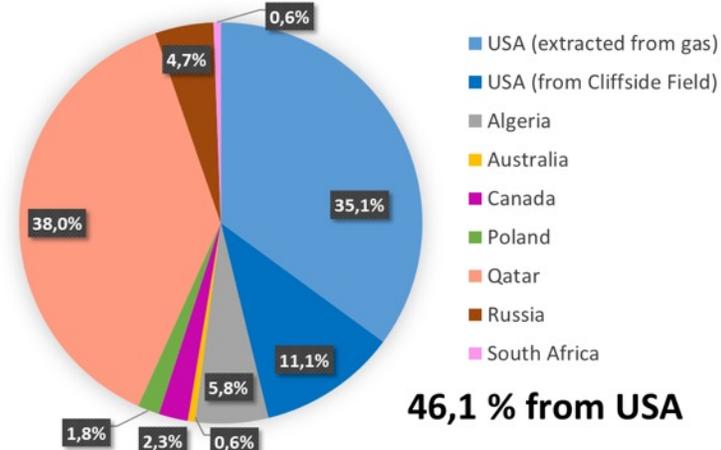


Helium sales in 1993 : 100.10^6 m^3



95 % from USA

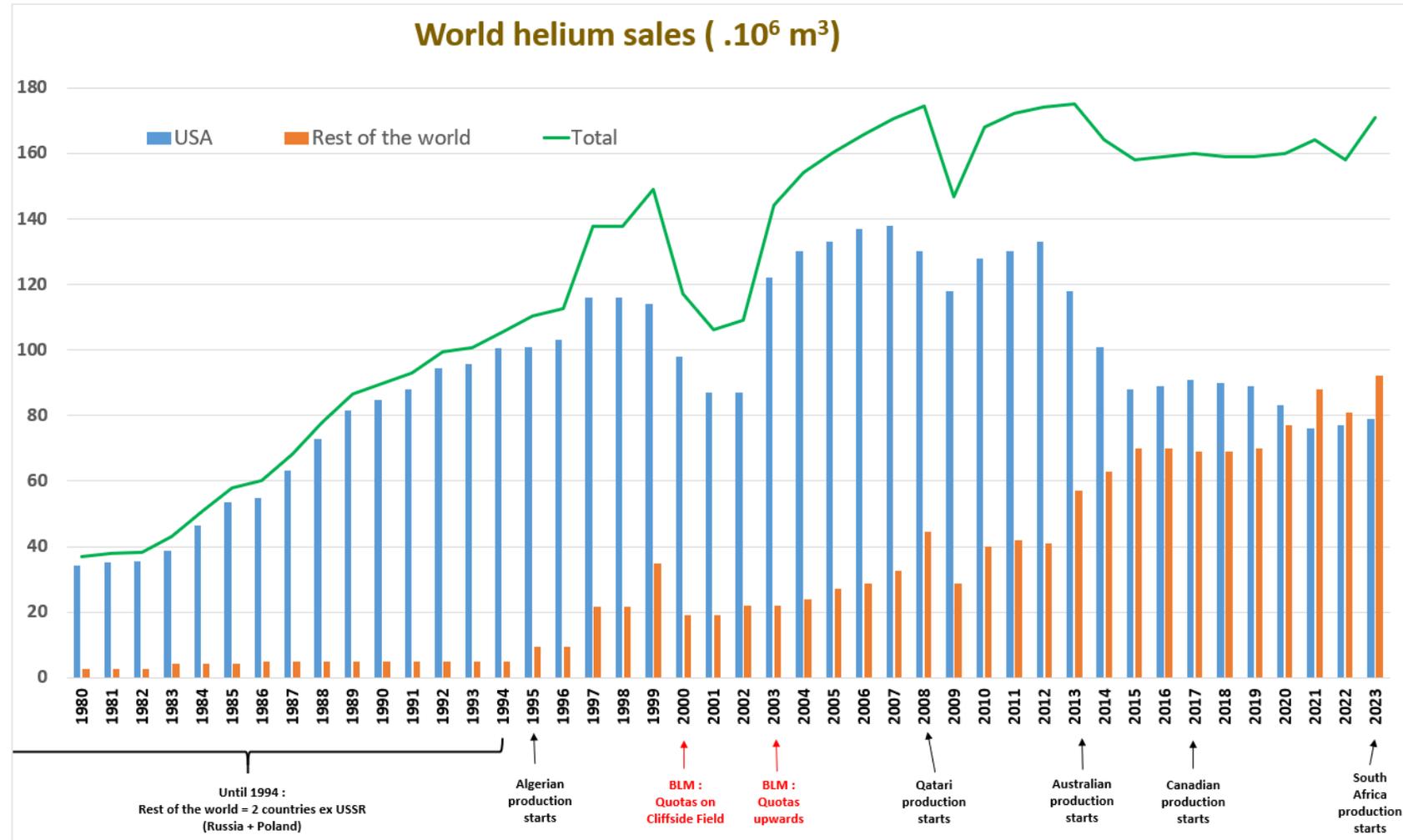
Helium sales in 2023 : 171.10^6 m^3



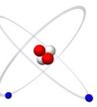
46,1 % from USA

Σ demandes > de 10 à 20 % Σ capacités de production depuis les années 2000

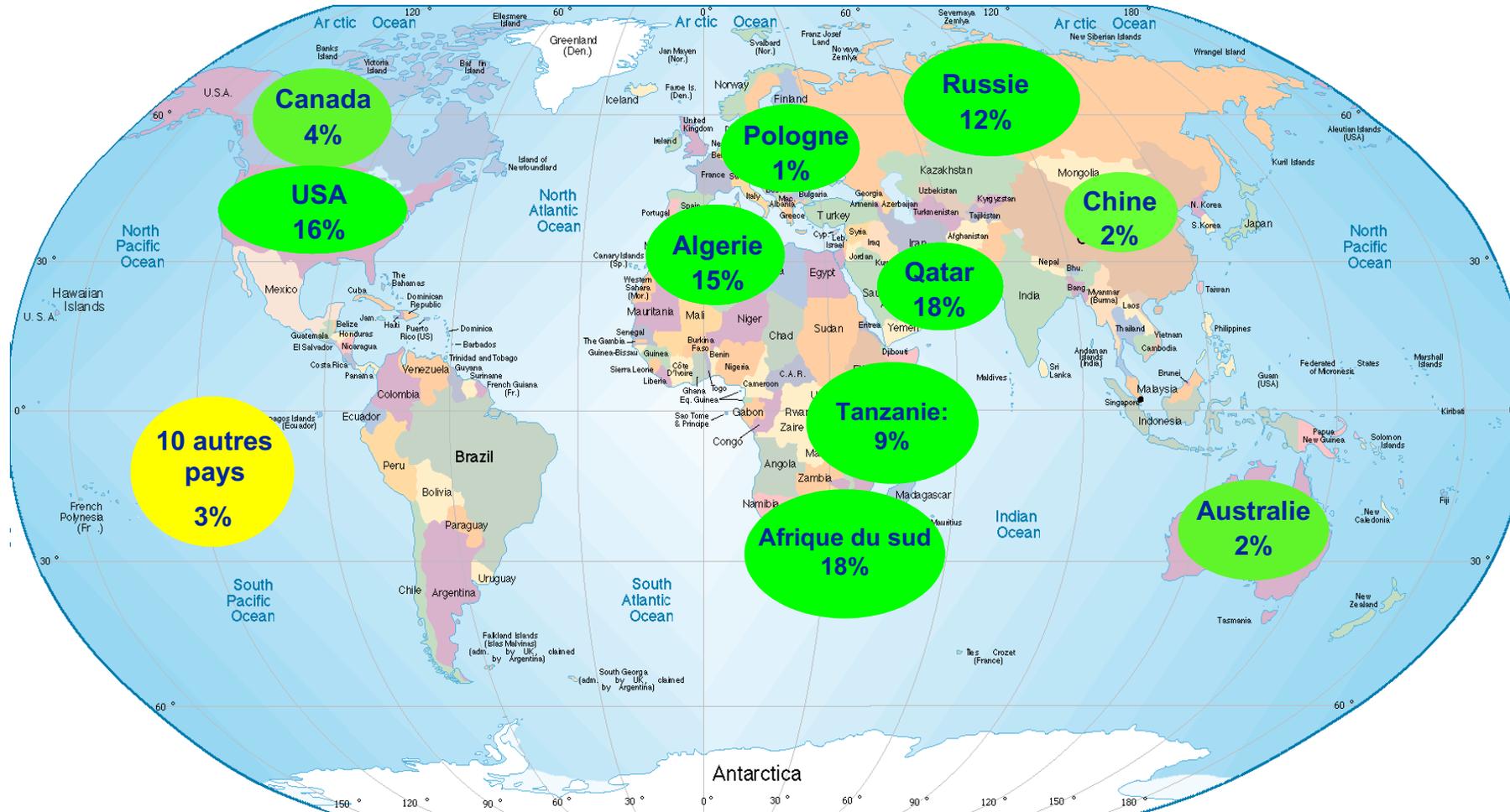
World helium sales ($.10^6 \text{ m}^3$)



Hélium 4 – Pénurie ?



Ressources mondiales estimées $\sim 55.10^9 \text{ m}^3$
(> 320 ans de consommation actuelle)



Recherche permanente (et parfois découverte) de nouveaux gisements



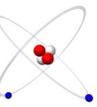
"A dream. It's perfect": Helium discovery in northern Minnesota may be biggest ever in North America



cbsnews.com
"A dream. It's perfect": Helium discovery in northern Minnesota may be ...
For a century, the U.S. Government-owned the largest helium reserve in the country, but the biggest exporters now are in Russia, Qatar and ...

10:30 PM · 1 mars 2024

Le problème n'est pas la disponibilité de la ressource mais l'organisation de son exploitation...



2023 : la demande est toujours supérieure à l'offre d'environ 15 à 20 %

Perspectives d'évolution de la production mondiale ?

- Qatar : volonté affichée de devenir n°1 mondial de l'hélium
- Russie : grandes ambitions à Amur, Sibérie mais... pb techniques + guerre en Ukraine...
- USA, Canada et Algérie : pas de réelle volonté de monter en puissance
- Pologne : gisement en fin de vie
- Afrique du sud : volonté d'augmenter les volumes
- Tanzanie : encore flou pour le moment

Les prix vont rester élevés

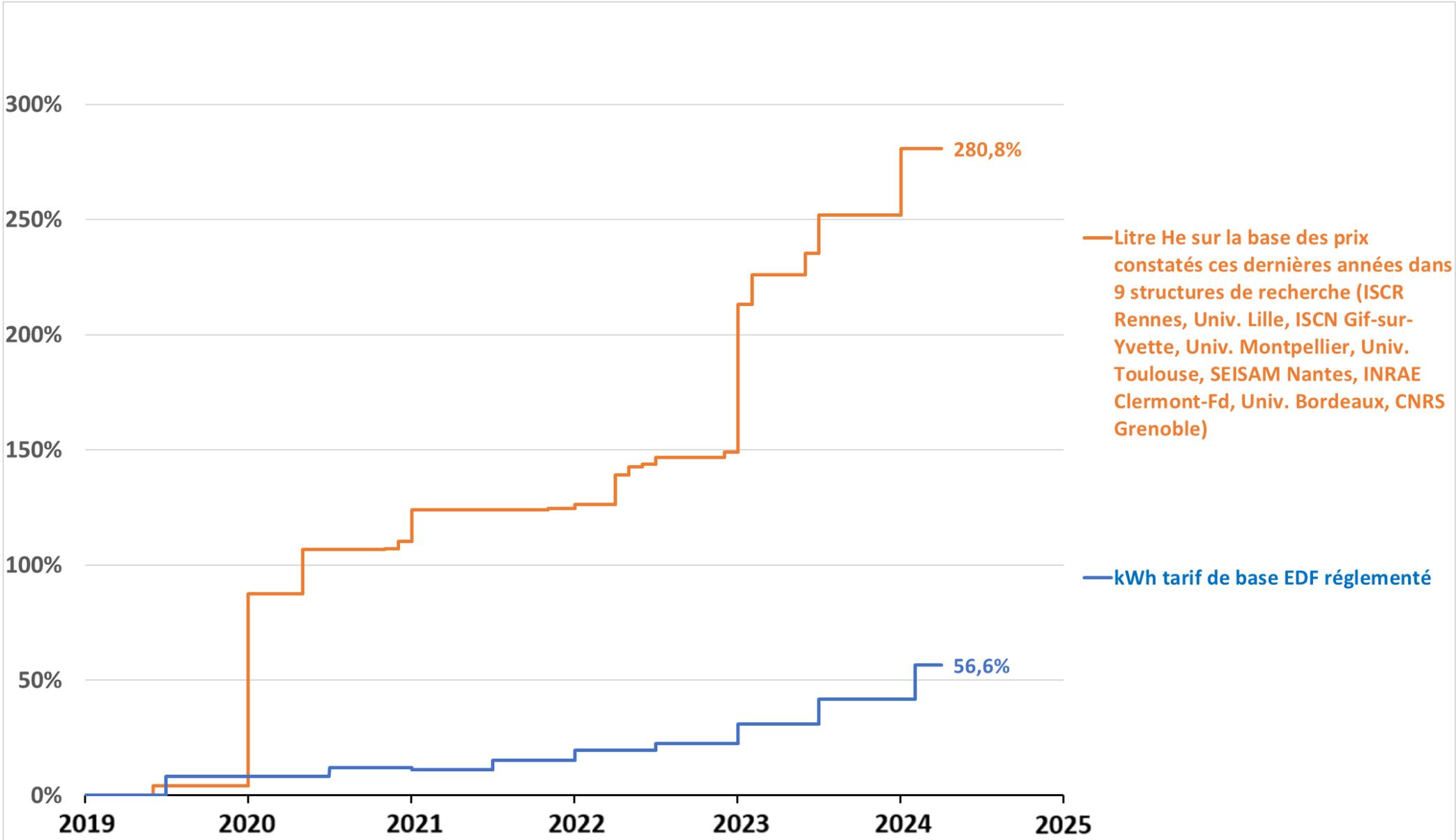
- Jusqu'en 2027-2028, voire plus selon situation Russie...

	2023	2030
	.10 ⁶ m ³	.10 ⁶ m ³
USA (extracted from gas)	60	60 ?
USA (from Cliffside Field)	19	0
Algeria	10	10 ?
Australia	1	1 ?
Canada	4	4 ?
Poland	3	0
Qatar	65	100 ??
Russia	8	60 ???
South Africa	1	10 ??
Tanzania	0	???
TOTAL	171	245 ??

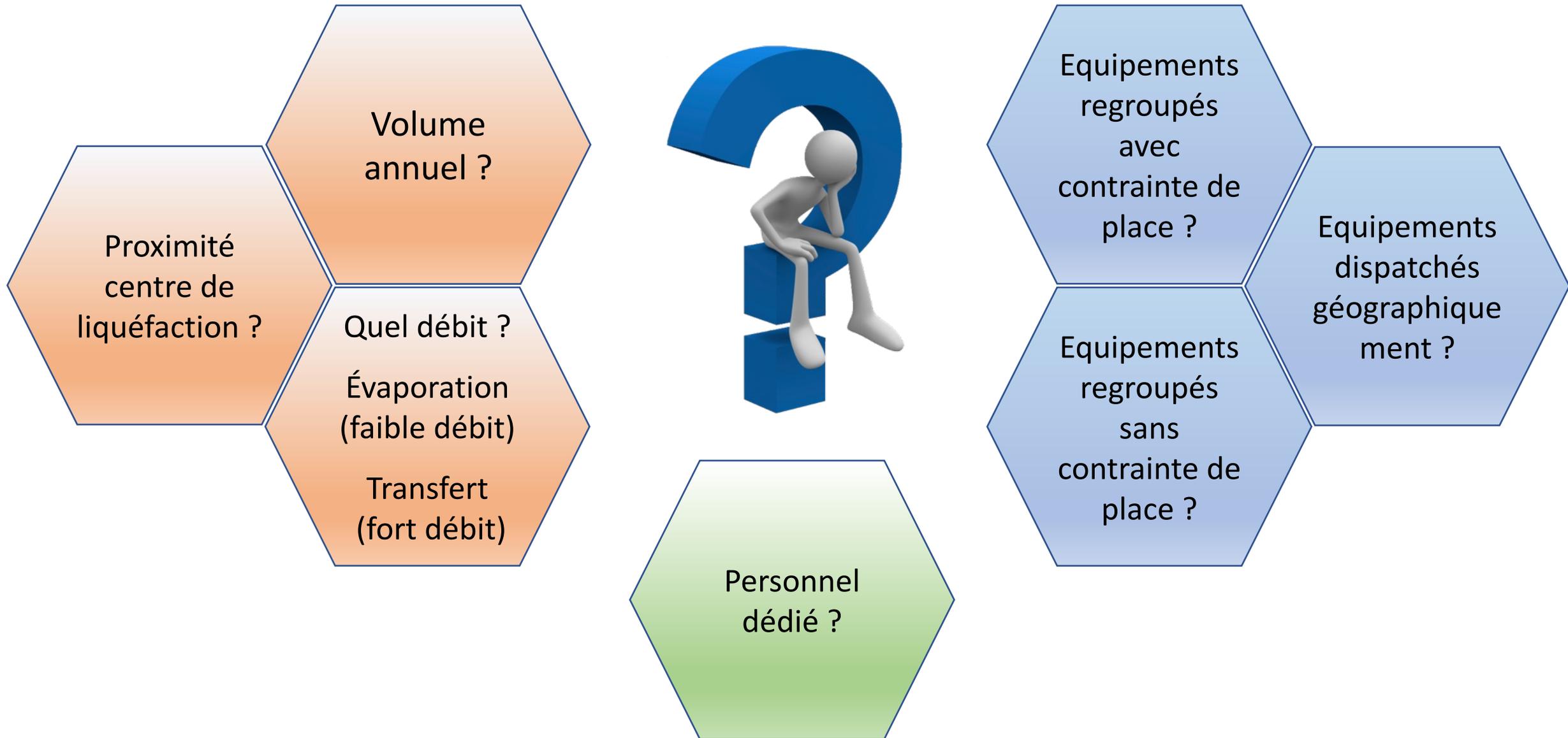


L'avenir est entre nos mains. Protégeons-le !

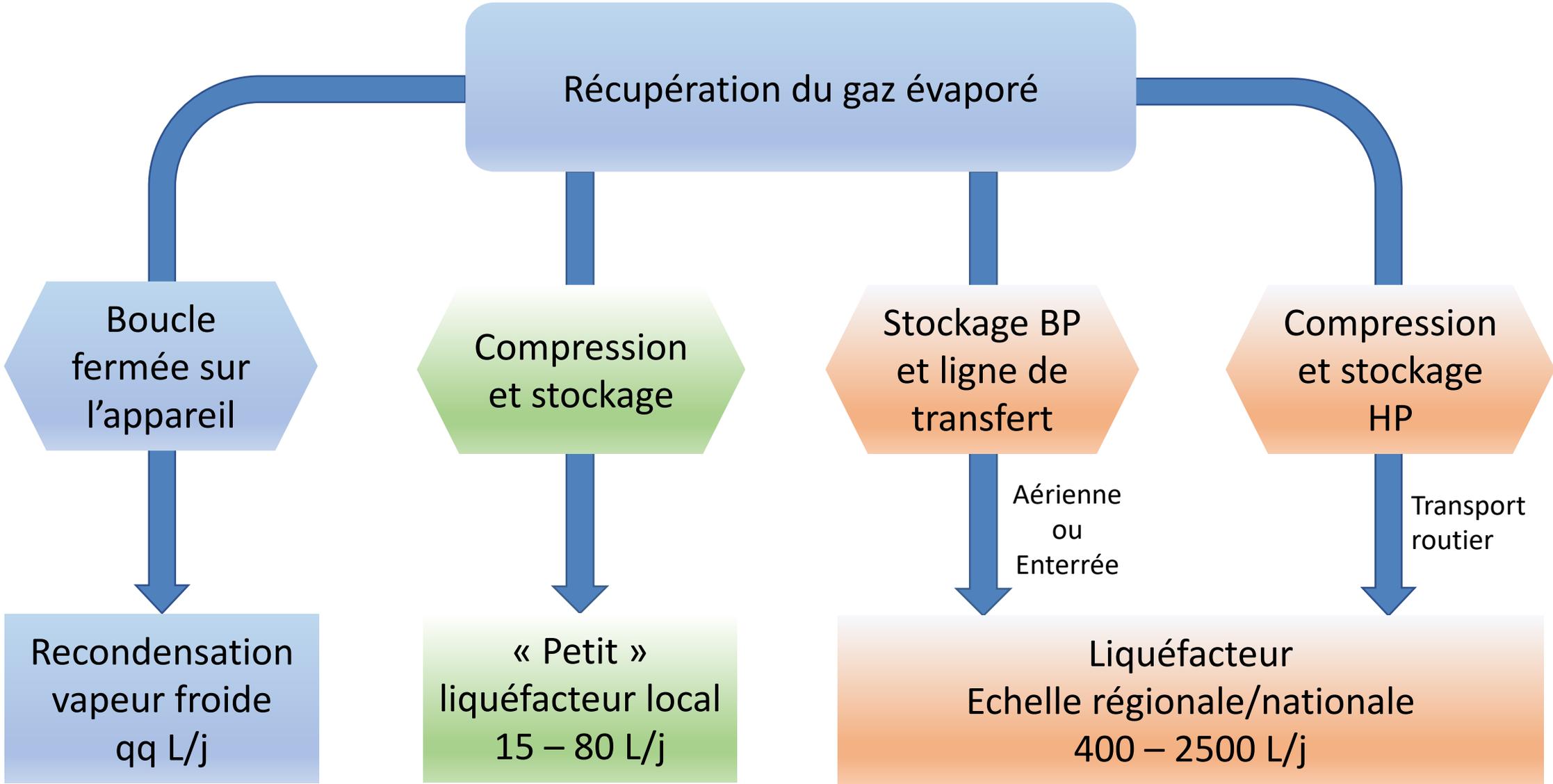
Evolution comparée coûts électricité et hélium liquide



Récupération Hélium → quelles questions ?

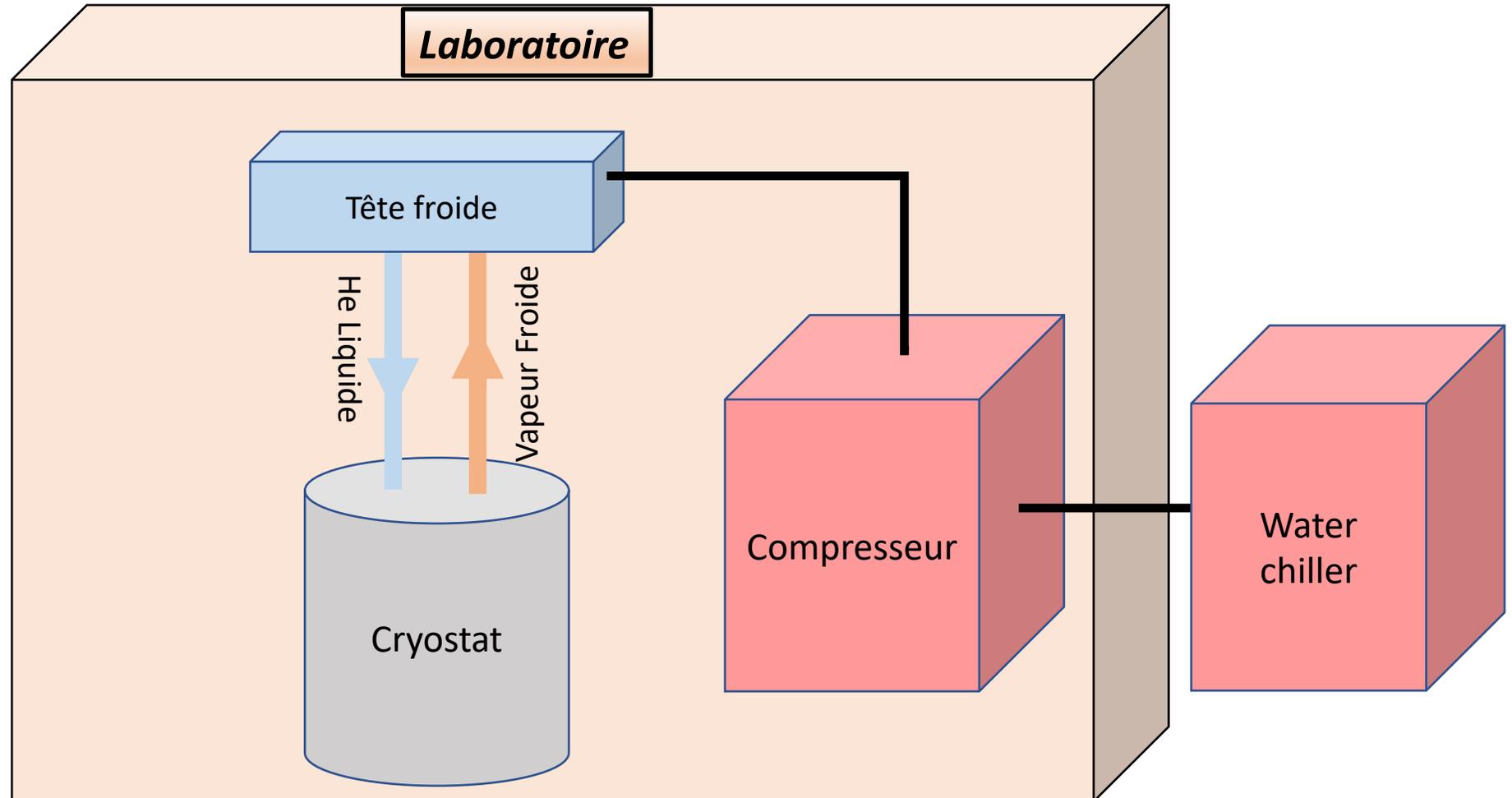


Récupération Hélium → quelles solutions ?



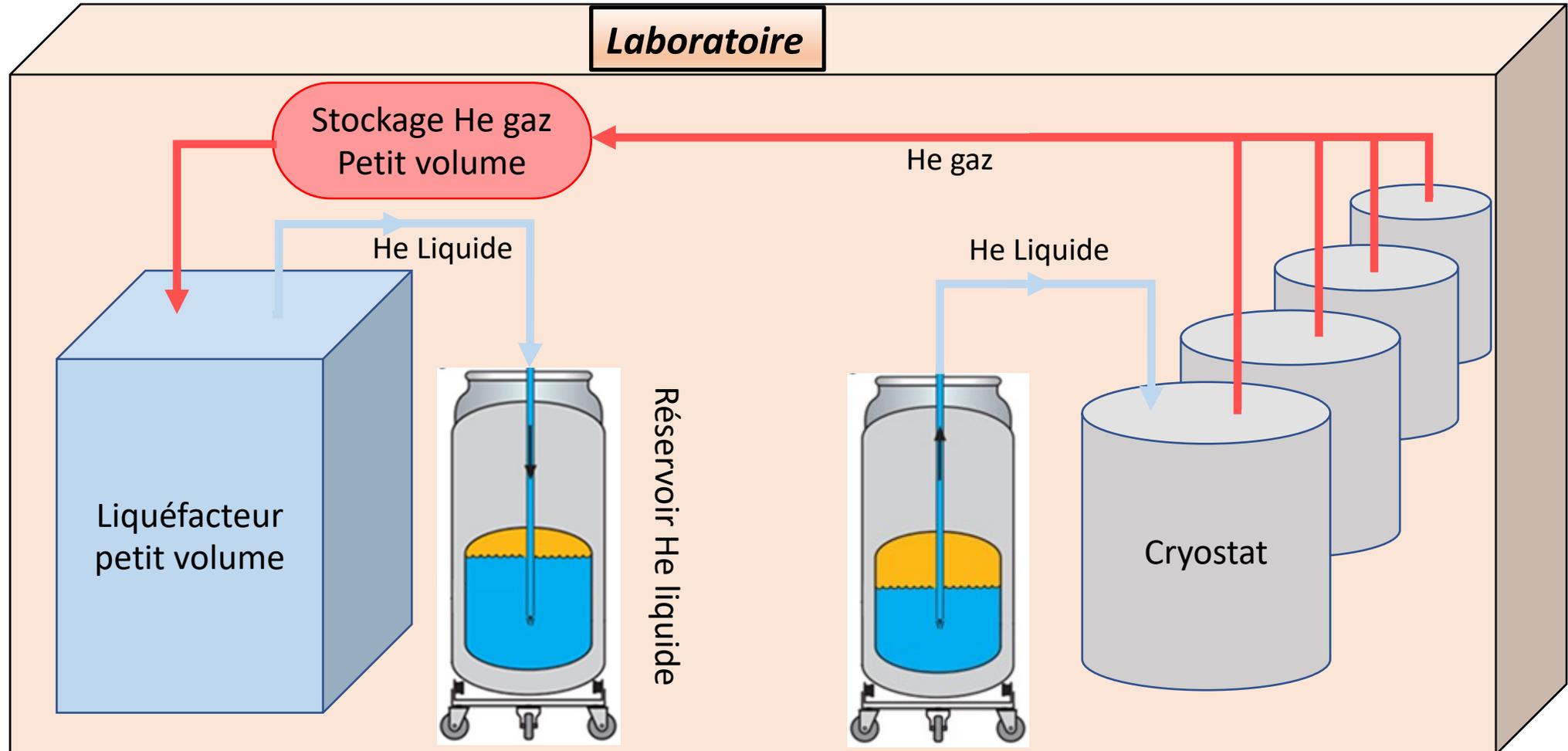
Schémas généraux récupération-liquéfaction

I) *Recondensation évaporation (très petits volumes)*



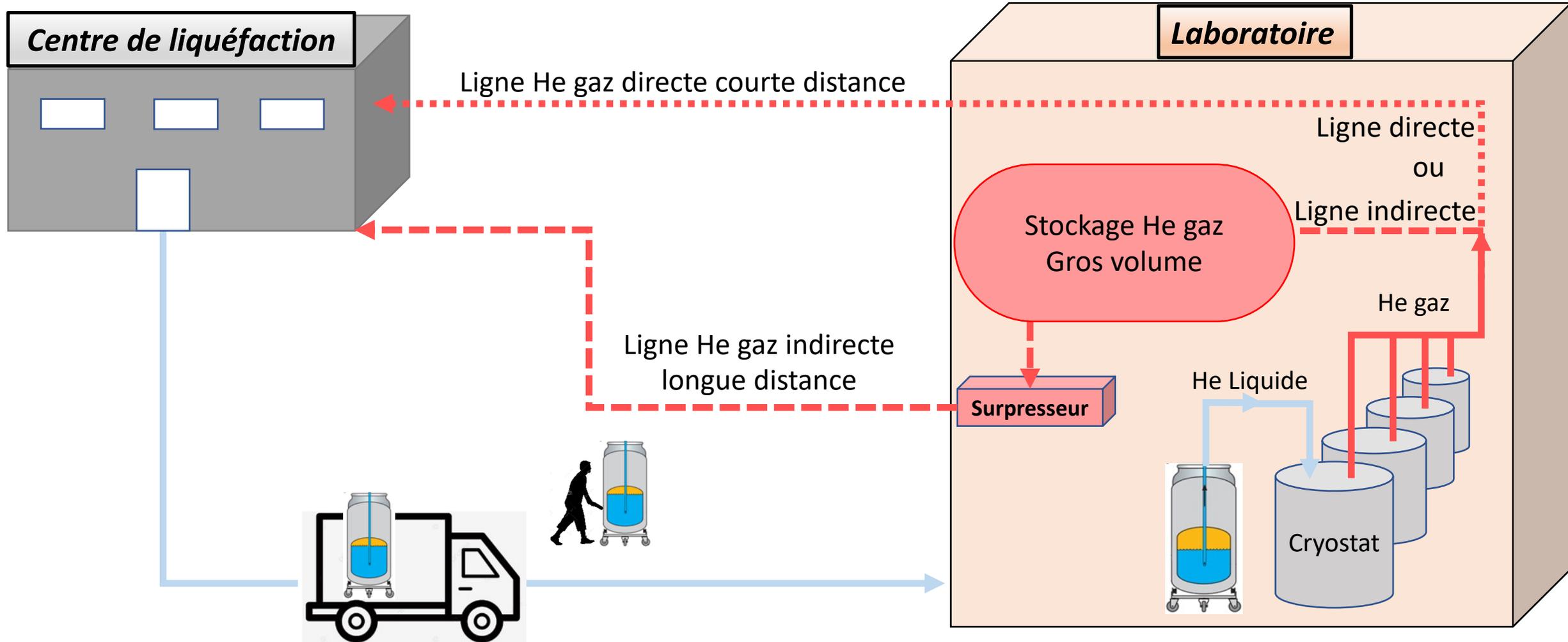
Schémas généraux récupération-liquéfaction

II) Récupération et liquéfaction «sur site» petit volume



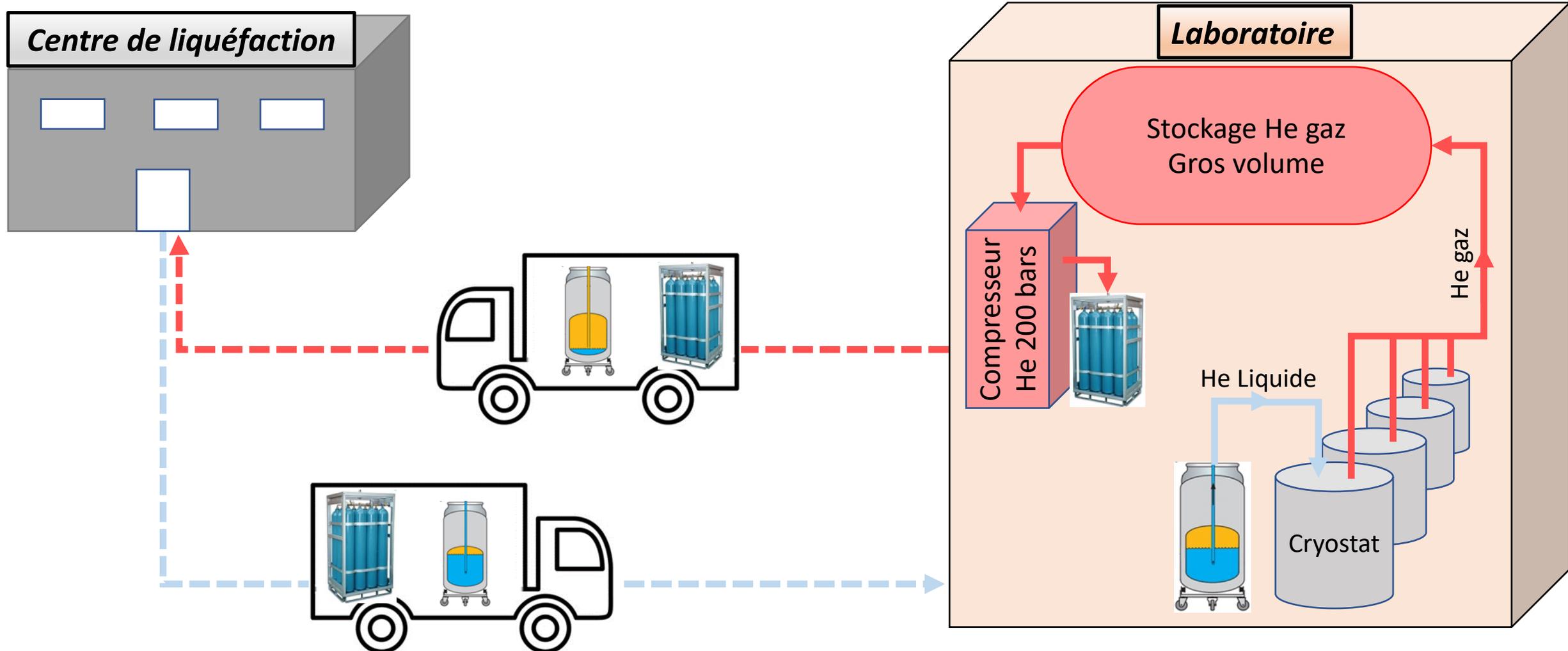
Schémas généraux récupération-liquéfaction

III) Récupération et transfert du gaz vers le centre de liquéfaction locale



Schémas généraux récupération-liquéfaction

IV) Récupération et transfert du gaz vers le centre de liquéfaction distant



Bilan solutions de récupération-liquéfaction

I) Limites et nécessités

	Tête froide sur instrument (1L/j)	Petit liquéfacteur local (15L-80L/j)	Transfert ligne → liquéfacteur de proximité	Transport routier → liquéfacteur après compression et stockage HP	
Nombre cryostat	Système isolé	-	-	Système isolé ou jusqu'à 3 cryostats proches	Système isolé ou plusieurs cryostats
Emprise au sol	2 m ²	> 20 m ²	De 0 à 30 m ²	5-10 m ²	> 10 m ²
Nuisances Sonores	Nuisance de proximité en fonctionnement				
	Bruit cryogénérateur dans la pièce avec l'instrument	Prévoir installation dans une pièce séparée et isolée	Si gazomètre + surpresseur, Prévoir pièce dédiée avec insonorisation des locaux	Prévoir pièce ou bâtiment dédiée avec insonorisation des locaux	
Points de vigilance	Installation ventilée, présence de détecteurs d'O ₂ avec alarme / Température de la salle comprise entre 5 et 45°C				
	-	Gazomètre non exposé au UV, ni aux intempéries			
	Maintenances équipement à respecter			<ul style="list-style-type: none"> - Cadre 200 bars à proximité du compresseur - Prévoir espace manutention cadres - Requalification des bouteilles gaz tous les 10 ans (~150€/bouteille) 	

Bilan solutions de récupération-liquéfaction

II) Coût des systèmes

	Tête froide sur instrument (1L/j)	Petit liquéfacteur local (15L-80L/j)	Transfert ligne → liquéfacteur de proximité	Transport routier → liquéfacteur après compression et stockage HP	
Coût équipement	90 k€ (He) -200 k€ (He + N ₂) (tête froide + compresseur + water chiller)	300-600 k€ (Liquéfacteur + purificateur + filtres)	gazomètre + surpresseur si grandes distances (qq centaines de m) 20-30 k€	50-60 k€ (compresseur + 3 cadre de 6 bouteilles)	70-125 k€ (compresseur + gazomètre + 3 cadre de 12 bouteilles)
Coût « accessoires »	-	Dewars Hélium liquide transportables 120L: 12 k€ 250L: 28 k€ 450L: 31 k€	-	Dewars Hélium liquide transportables 120L: 12 k€ 250L: 28 k€ 450L: 31 k€	
Coût raccordement Électrique Plomberie Ligne	Installation triphasée Groupe extérieur (chiller)		Ligne souterraine Coût fonction distance revêtement (limite raisonnable 1 km)	Installation triphasée	
	20-30 k€ pour la ligne dans laboratoire				
Coût fonctionnement Coût électricité	7 kWh en continu (~15 k€/an)	8-31 kWh en fonctionnement (~15-60 k€/an)	Moins de 1 kWh en fonctionnement	2,2 kWh (4m ³ /h)	15 kWh (25m ³ /h)
Coût maintenance annuelle	2,5-10 k€	15-20 k€	-	2 k€	5 k€
Coût transport	-	Pas de coût si liquéfacteur installé sur site	-	2-3 k€ AR	

Bilan solutions de récupération-liquéfaction

III) Compétences/besoins RH associés aux systèmes

	Tête froide sur instrument (1L/j)	Petit liquéfacteur local (15L-80L/j)	Transfert ligne → liquéfacteur de proximité	Transport routier → liquéfacteur après compression et stockage HP
ETP	Surveillance	0,5-1	Surveillance	0,25-0,5
Formations nécessaires	Formation initiale fournisseur	Formation initiale fournisseur	-	Formation initiale fournisseur TMD (Transport Matières Dangereuses)
Compétences requises	Cryogénie Mécanique	Cryogénie Mécanique Logistique	Mécanique	Cryogénie Mécanique Logistique
Temps de prise en main	< 1 an	2 ans	2 mois à 1 an selon si transfert direct ou gazomètre et surpresseur	2 ans
Mise en place d'une « astreinte » pour nécessité de service	oui	oui	oui	oui

Conclusion

Devoir de récupération-liquéfaction → Ressource difficilement renouvelable / Sécurisation de l'approvisionnement : demande dépassant l'offre / Indépendance vis-à-vis de problème géopolitique.

Gain financier ? → transfert du coût de l'hélium vers d'autres postes de dépenses (investissement, électricité, transport)...

Point essentiel → le taux de récupération > 85% / taux de pureté (hélium non souillé) > 98%.

Experience of MetaToul Platform



400-500L



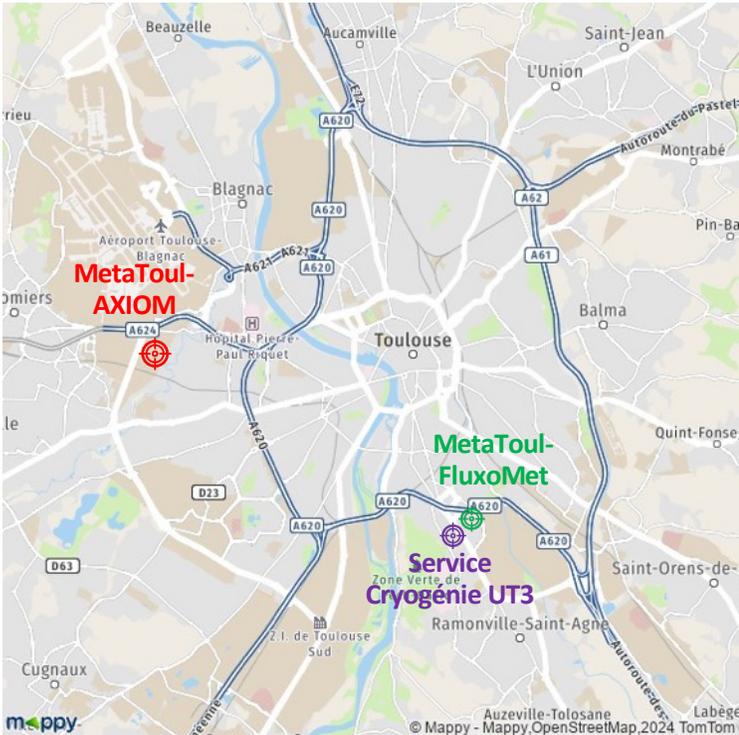
2000L



450L

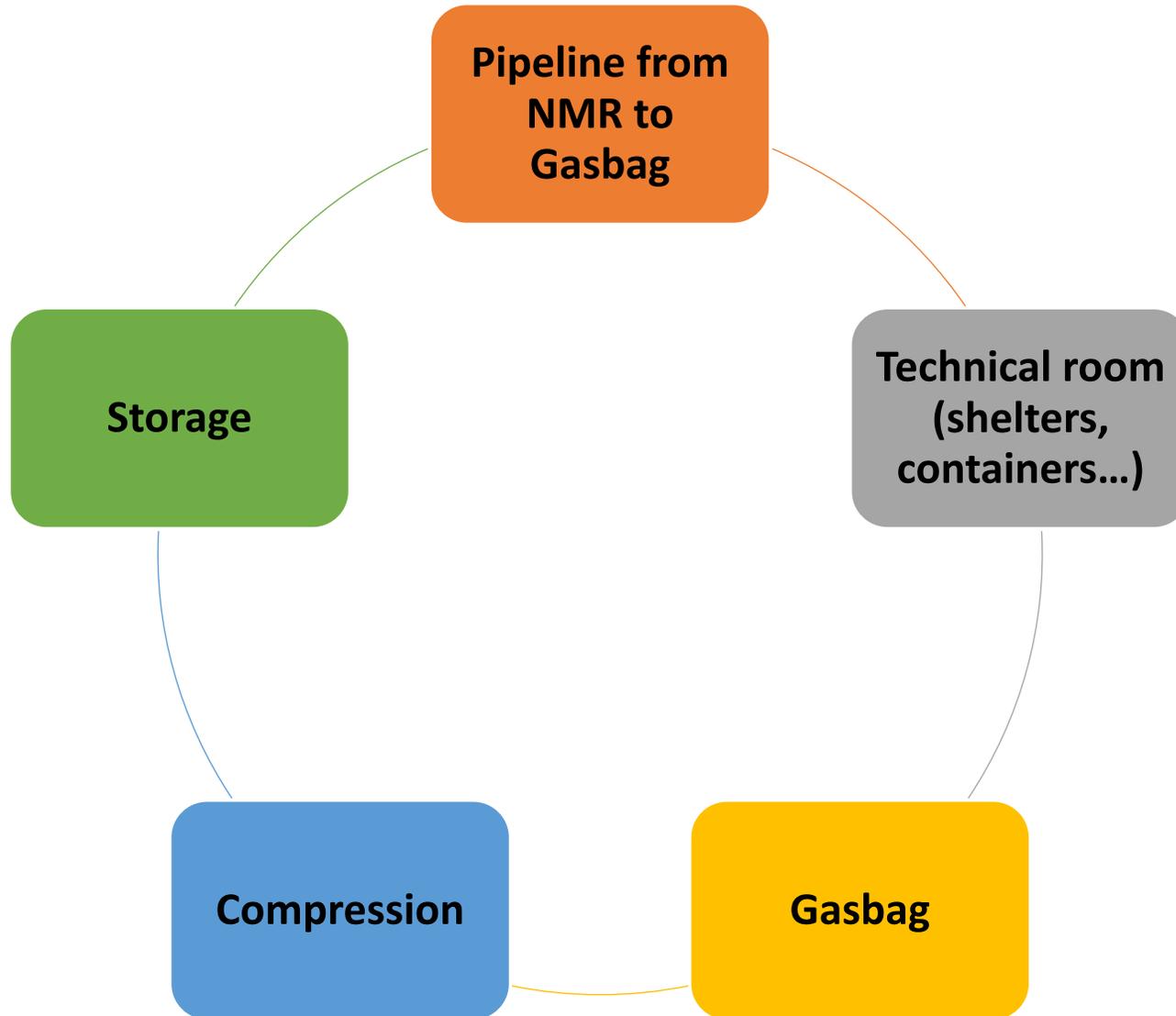
- Three spectrometers within the NMR services of MetaToul (2 sites)
- Around 3000L of liquid Helium per year
- 80k€ per year

Fragile market
High risk of supply failure



- Project initiated as part of the rejuvenation of the liquefier at the Toulouse UT3 faculty
- Federation of different laboratories in Toulouse to set up helium recovery in order to become gas suppliers for the cryogenics department
- Funds raised from laboratory supervisors to contribute to the project (CNRS, UT3, INSA and INRAE)
- Set up a consortium for joint, structured action in 2023 (start of discussion 2021-2022)

Experience of MetaToul Platform



- Definition of recovery requirements
- Estimation of loss volume depending on the situation: during filling and/or boil-off
- Estimation of whether or not the system can be installed on the rooms
- Depending on filling frequency and method (single or multiple fillings), calculation of the best compressor/gasbag pairing
- Definition of the number of storage racks to ensure optimum rotation with the cryogenics department
- Drafting of technical specifications for grouped call for tenders

Experience of MetaToul Platform

MetaToul TBI: Call for tender in progress
Delivery expected end of 2024
Commissioning in early 2025

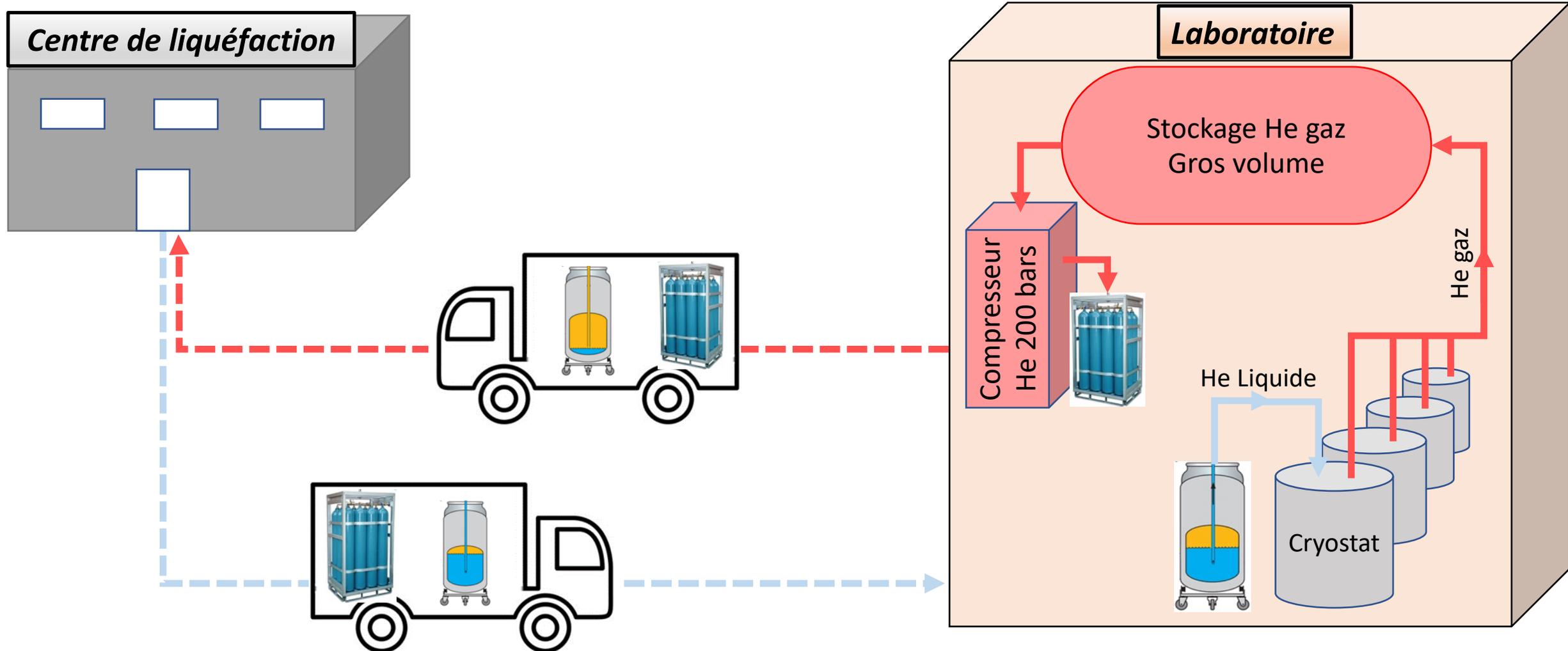


MetaToul Toxalim: contract awarded with Heliosmart
bruker solution - awaiting delivery and installation 1st
half 2024



Schémas généraux récupération-liquéfaction

IV) Récupération et transfert du gaz vers le centre de liquéfaction distant



Exemple installation de Lille

Contexte

- Nouveau bâtiment RMN 1200 (local technique récupération prévu à la construction)
- Bâtiments voisins (C4, extension C4, RMN1200)
- 4 RMN bas champ (3x400 MHz, 300 MHz) + FT-ICR (9,4T) soit 1200 L/an
- 2 aimants pompés RMN800 et RMN1200 (1800 + 2500 L/an)
- Total : ~ 5500L



Exemple installation de Lille

Solution technique :

- Gazomètre (baudruche) de 20m³
- Compresseur de 25m³/h
- 4 cadres de 12xB50x200 bar (~140L de liquide/cadre)
- 2 réservoirs (100L + 500L)
- Réseau PVC HD intérieur dans le bâtiment C4+ extension
- Réseau INOX RMN800, RMN1200 vers local hélium (passage extérieur)



Récupération du gaz pompé et du gaz flash durant transfert : 60L évaporé en 1h30 soit 45m³)

Bas champ : uniquement évaporation statique



Exemple installation de Lille

- Transport pour liquéfaction vers Paris
- Pureté 98 % (à améliorer)
- Bilan 2023 :

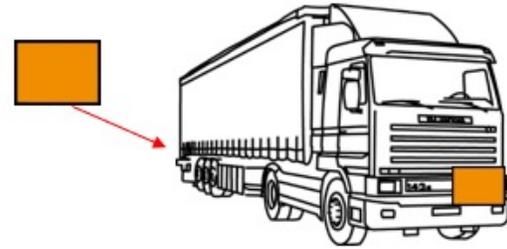
Liquéfaction				
Volume (L)	Coût liquéfaction € (~4,5 €/L)	coût transport 11 A/R	coût total	Coût par L
3 935	17903	31989	49891	12,68
Appoint hélium				
Volume (L)	Coût achat €	Coût par litre		
700	20 856	29,79		
Maintenance (filtres, réparation de cadres...)				
coût	7 127			
Coût total				
Volume (L)	coût €	Coût par litre	taux de recyclage	
4 635	77 874	16,80	84,90 %	



Transport d'hélium

Transport de matière dangereuse (TMD)

- Hélium cryogénique UN1963
- Hélium sous pression UN1046



Transport de colis



Transport soumis à la réglementation européenne de TMD par la route (ADR)

- Chaîne de responsabilité :
 - Expéditeur (doit vérifier la conformité de l'ensemble de la chaîne)
 - Transporteur
- Formation des intervenants
- Réservoirs/cadres homologués pour la route et étiquetés (ADR)
- Respect des consignes de sécurité
- Conseiller à la sécurité obligatoire au niveau de l'entreprise (ex. CNRS)
 - Rapport Annuel



Transport d'hélium (Coût)

Transport via un transporteur

- Réservoir seul (utilitaire) : ~ 1.2€/km
 - (trajet total base à base transporteur: par ex. Lille Paris 2x250km ~ 600€)
- Cadres de bouteilles (> 500kg) (camion porteur) : 2.4€/km

Transport simplifié en propre possible sur des quantités limitées

- sur des quantités limitées (contenant < 1000 U)
- exemple : université de Strasbourg
- Véhicule selon prescriptions ADR (chargement séparé de la cabine)

Ulisse : service du CNRS de logistique dont TMD

- Conseillers à la sécurité pour les unités rattachées au CNRS
- Organisation de transport avec vérification de l'ADR (surcoût)



Unité de Logistique Internationale
Services et Soutien aux Expériences

Transport d'hélium (remarques)

Disposer de ses propres réservoirs homologués

- Cadres (5 à 10k€ selon contenance)
- Réservoir hélium (10-20k€)
- Location de cadres quasiment impossible

Requalification réglementaire décennale des réservoirs sous pression

Attention incidents de transport fréquents (cadres renversés, réservoirs tombés du camion, aléas climatiques...) : bien choisir ses prestataires



Interaction avec la Plateforme de Liquéfaction

Exemple du Centre de Liquéfaction de l'Institut Néel (Grenoble)

- Le réservoir d'hélium liquide est fourni par le centre de liquéfaction. (Possibilité d'acquérir son ou ses propres réservoirs)
- Il est pesé au départ et au retour.
- La différence est facturée au tarif qui correspond au coût de liquéfaction. 3,70€/l (CNRS/UGA) et 5€/l (acad externe) en 2023.
- Retour sous forme de gaz comprimé, le client doit s'équiper d'un stockage HP 200 bars transportable.
- Les transporteurs sont affrétés par le laboratoire client.
- A la suite d'une mesure de pression et de température le cadre est déchargé par le personnel du service de liquéfaction.
- On calcule la différence entre la quantité d'hélium prélevée dans le réservoir et la quantité d'hélium rendue sous forme gazeuse. Cet hélium qui est perdu est facturé au prix d'achat chez le fournisseur. 34,60€/l en 2023.
- Le montant facturé est la somme de la quantité d'hélium fournie à 3,70€/l et de la quantité d'hélium perdue à 34,60€/l. Exemple : avec un taux de pertes de 10%, pour 100l utilisés, le total facturé sera : $100 \times 3,70 + 10 \times 34,60 = 716\text{€}$. Soit un coût au litre de 7,16€.

Conversion: 1 kg He = 8 L He liquide = 6m³ He gaz

1 L He liquide = 0,75 m³ He gaz

Conclusions

Solutions techniques
de recyclage/reliquéfaction:

- A adapter à son propre équipement/écosystème
- Maillage territorial des centres de liquéfaction

Coût d'achat – entretien - maintenance
Coûts direct ou indirect (électricité, transport, ...)

Impact sur les métiers/carrière
Resp. plateforme scientifique:
Formation / Réseaux

Site web GERM:

<http://germ-asso.fr>

Réseau de discussion et d'échanges d'informations sur la récupération/reliquéfaction (L. Ronayette, E. Morvan, J. Guilhot, L. Peyriga)

<https://listes.services.cnrs.fr/wws/info/helium>

Réseau de discussion et d'échanges d'informations sur la cryogénie (L. Moreau, L. Ronayette)

<https://listes.services.cnrs.fr/wws/info/cryogenie>

Fascicule de Cryogénie et de Supraconductivité

Edité par l'Association Française du Froid, Commission Cryogénie et Supraconductivité et Les Techniques de l'Ingénieur

<http://www.affccs.org/index.php/venue/>

Gazomètre = baudruche = ballon (gasbag en anglais)

Boil-off = évaporation du bain en statique (utilisation)

Gaz flash/flush = évaporation durant le transfert He (remplissage)