

# L'univers chargé, à ultra-haute énergie

## Quatre contributions :

**Unité** de la problématique **des rayons cosmiques** : du sub-GeV au ZeV

Denis Allard (APC) et  
Alexandre Marcowith (LUPM) *et al.*

Découvrir l'origine des UHECRs avec **Auger**

Corine Bérat (LPSC) et  
Olivier Deligny (IPN/FLUO) *et al.*

**GRAND** : l'univers UHE via la détection radio

Olivier Martineau-Huynh (LPNHE) *et al.*

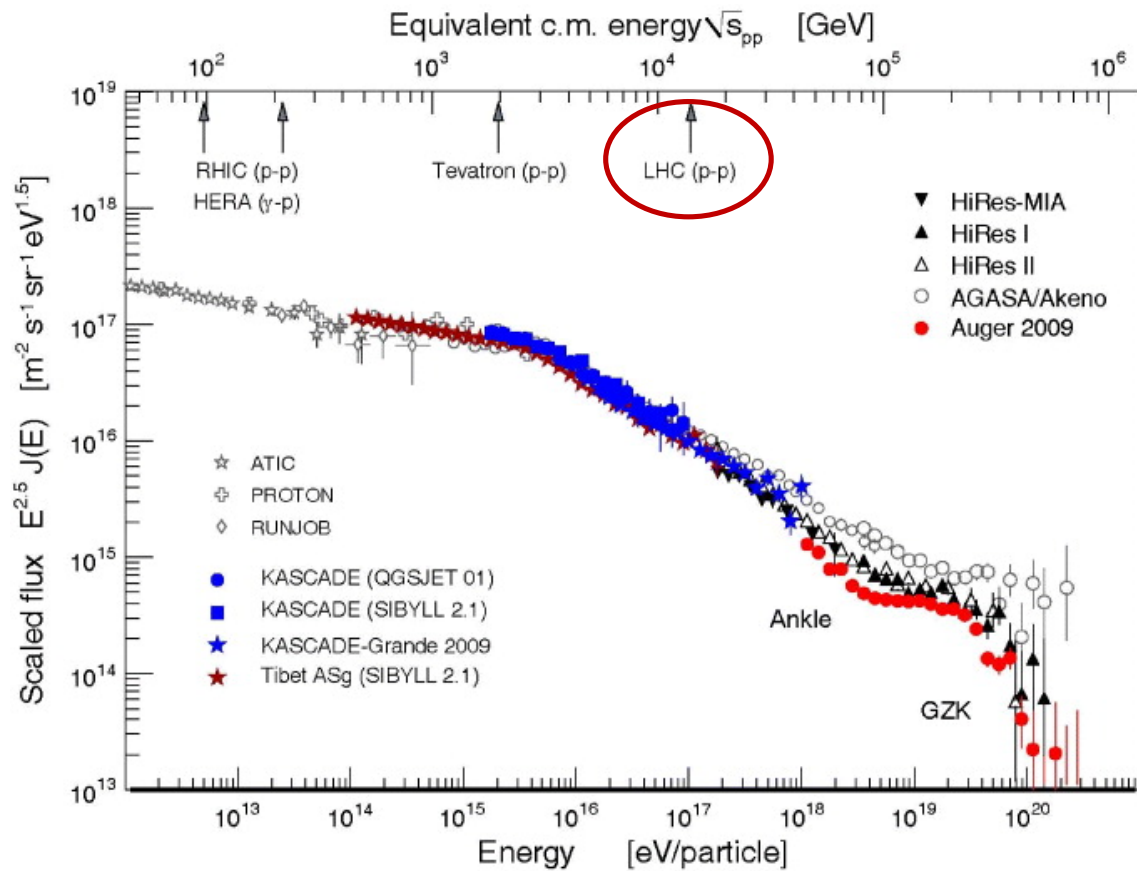
UHECRs : **la voie spatiale**

Étienne Parizot (APC) *et al.*

# Contexte : Rayons cosmiques et Rayons cosmiques d'ultra-haute énergie

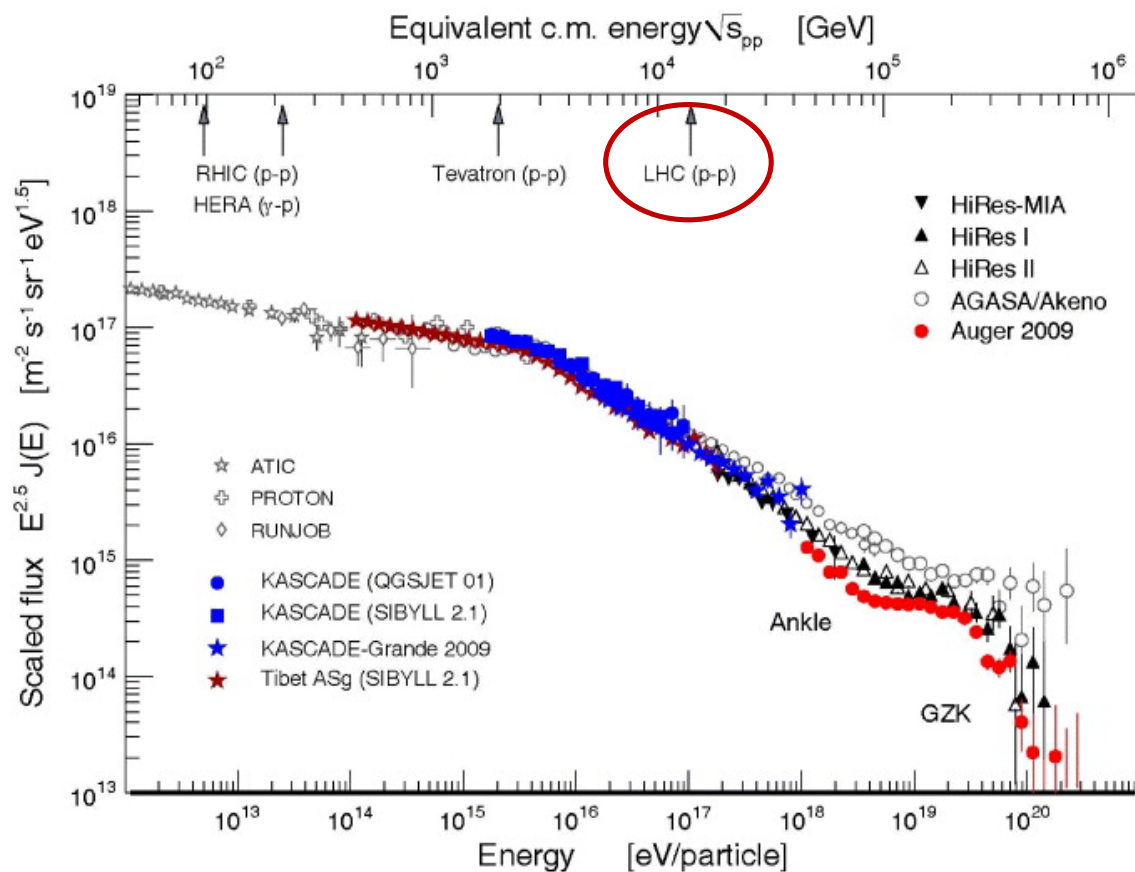
UHECR : particules les plus énergétiques de l'univers

★ **Astroparticules** : Physique des hautes énergies et astrophysique

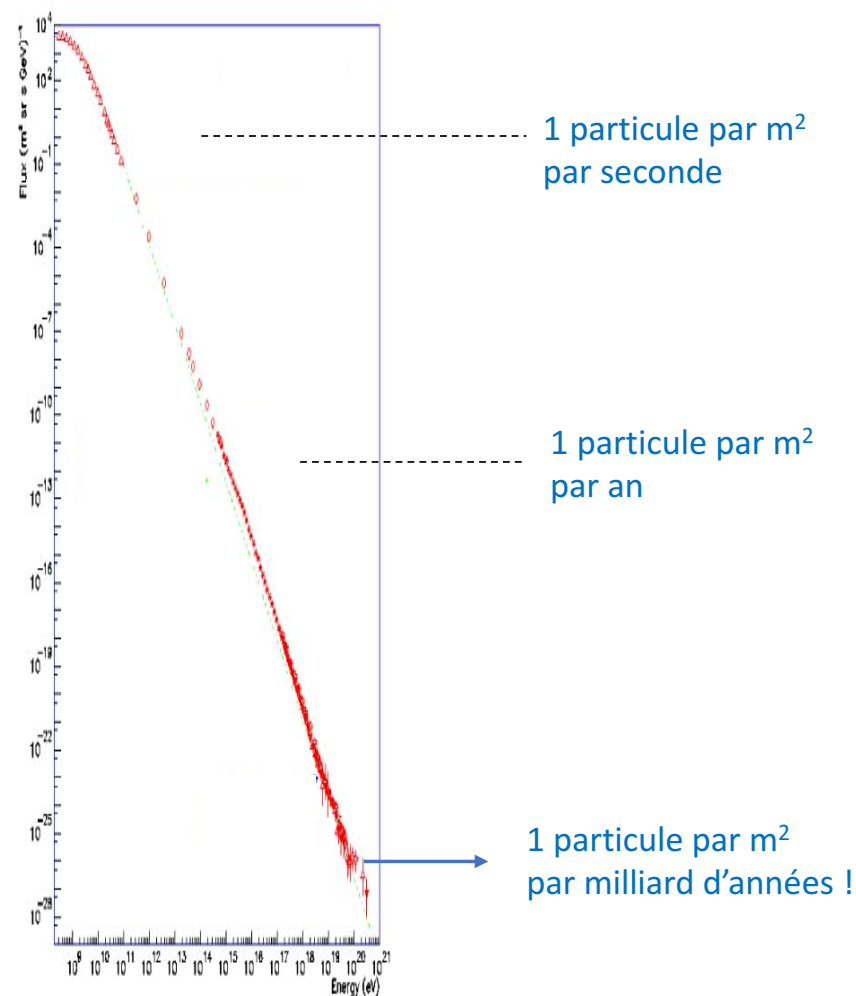


# Contexte : Rayons cosmiques et Rayons cosmiques d'ultra-haute énergie

★ **Astroparticules** : Physique des hautes énergies et astrophysique



**UHECR** : particules les plus énergétiques de l'univers

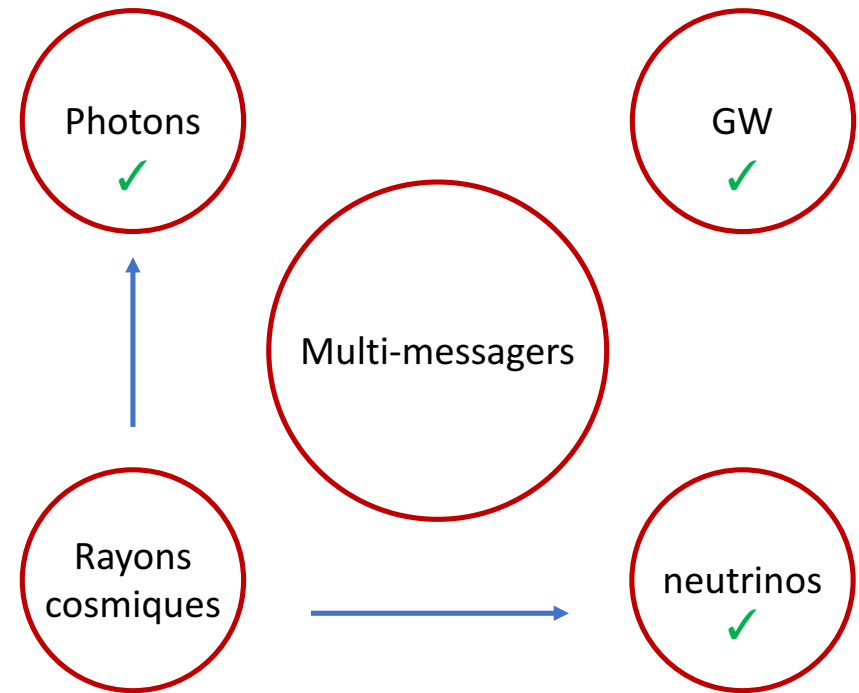


# Contexte

★ **Stratégie multi-messagers** : 4 piliers indissociables

- ★ De -10 000 au 18<sup>e</sup> s. : astronomie visible (position et magnitude)
- ★ 19<sup>e</sup> siècle : Révolution de la spectroscopie
- ★ 20<sup>e</sup> siècle : Révolution du multi-longueurs d'onde
- ★ 21<sup>e</sup> siècle : Révolution du multi-messagers

★ **Pivot** de tous les efforts au niveau **international**



# Enjeux

- ★ **Explorer la Physique de l'extrême :** Physique en environnement extrême : densité d'énergie et/ou de masse, champs extrêmes (EM et grav.), échelles spatiales et temporelles extrêmes + multi-échelles, domaine d'énergie inexploré, espace-temps quantique, etc.
- ★ **Comprendre la Physique des sources :** Astrophysique des hautes énergies : contenu et processus énergétiques de l'univers

Multi-messagers => observables **complémentaires** et **contraintes** nouvelles

- ★ **Comprendre l'accélération des particules :** À l'origine de tous les rayonnements non thermiques observés (multi- $\lambda$ )
- ★ **Sonder l'univers :**  
(nouveaux messagers)
  - Utiliser les UHECRs pour sonder les champs magnétiques
  - Utiliser les neutrinos pour accéder au-delà des horizons  $\gamma$  et RC
  - Utiliser les deux pour contraindre l'évolution cosmologique des sources...
- ★ **Découvrir l'origine des rayons cosmiques :** Toujours **aucun progrès** sur l'origine bottom-up des UHECRs...  
(Et des GCRs !)

# RAPPEL IMPORTANT N°1 :

## UNITÉ du phénomène « rayons cosmiques » :

★ L'origine des **rayons cosmiques galactiques** n'est pas encore comprise

Combien de composantes ?

Quelles sources ?

Quel spectre source ?

Quelle énergie maximale ?

Quelle distribution spatiale ?

Quelle distribution temporelle ?

Interprétation du genou ?

Second genou, cheville, cheville légère...



**NB: crucial** en raison du lien avec MIS, ionisation, astrochimie, formation d'étoiles, LiBeB, champ magnétique, etc. !

**Accélération** des particules + **propagation** dans le milieu interstellaire + extension dans le **halo** + **vent galactique**

★ La **transition galactique/extragalactique** est une clé indispensable pour la phénoménologie des GCRs et des EGCRs !

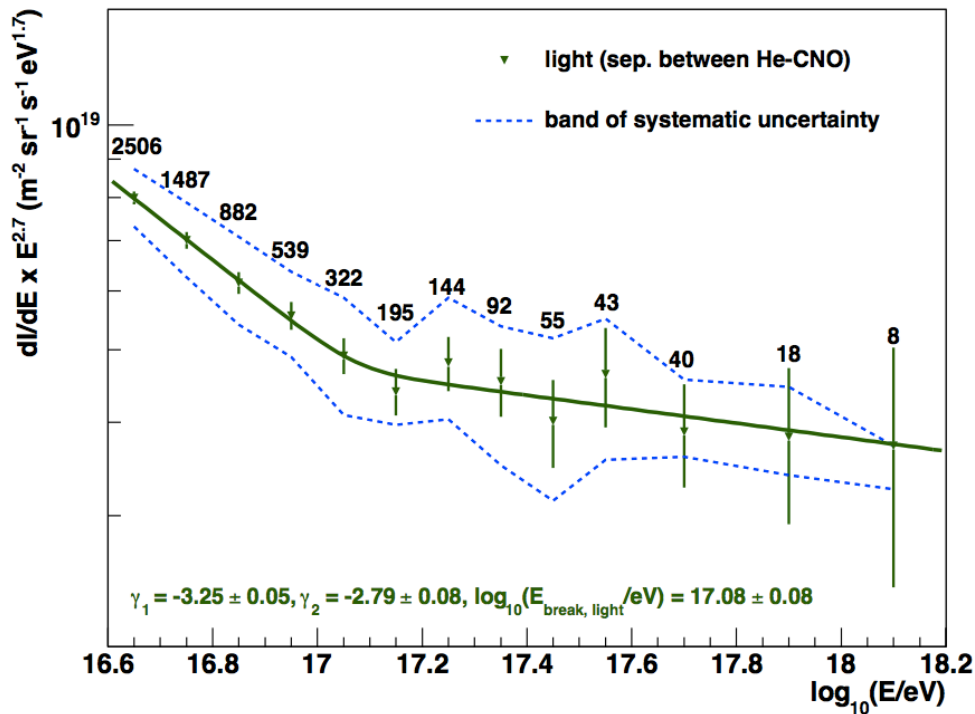
★ #IMHO: **les deux résultats fondamentaux** de la dernière décennies

1) KASCADE-Grande : **cheville des éléments légers**

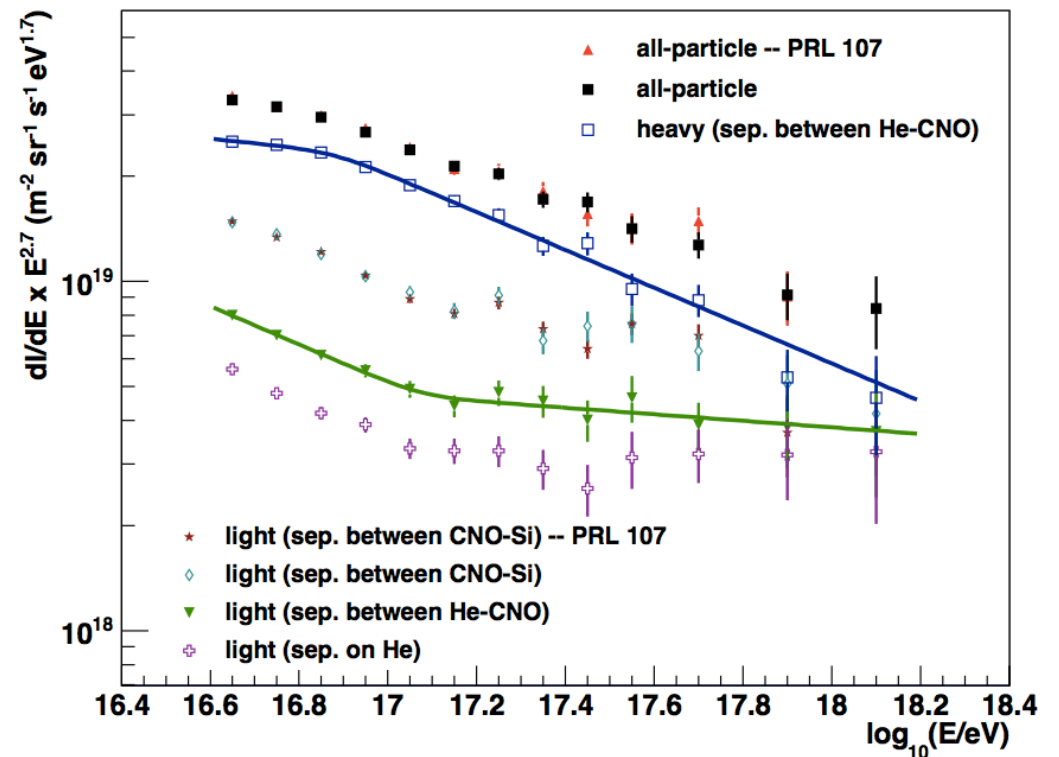
2) Auger : **transition vers les éléments lourds** à UHE

# RAPPEL IMPORTANT N°1 :

## UNITÉ du phénomène « rayons cosmiques » :

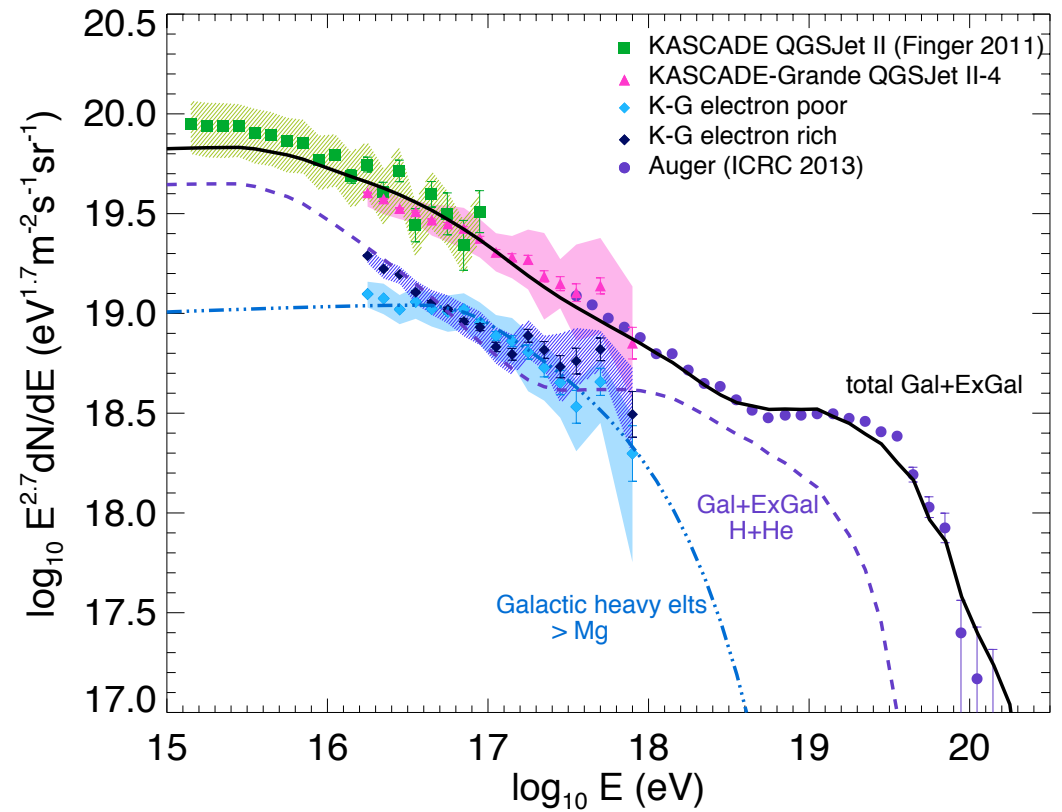
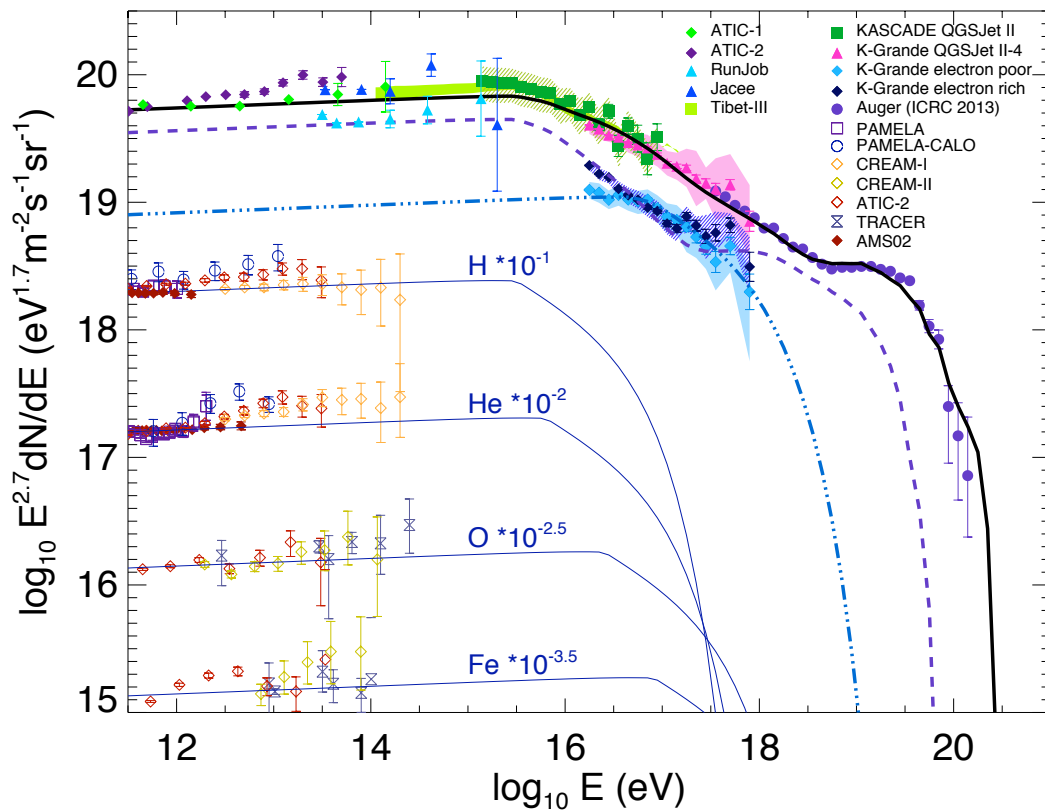


KASCADE-Grande (2013)



# RAPPEL IMPORTANT N°1 :

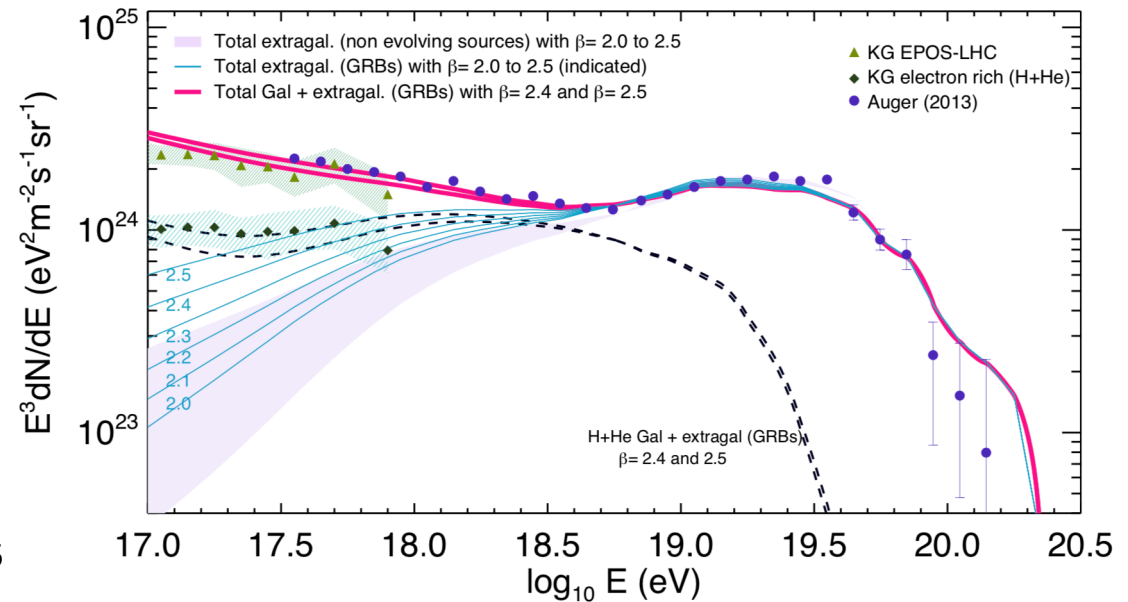
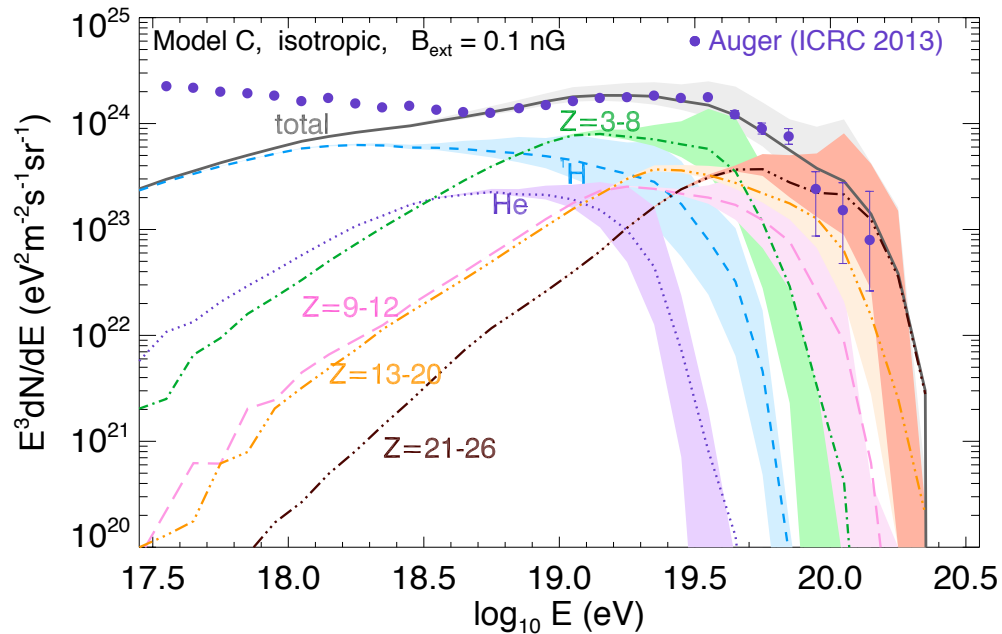
## UNITÉ du phénomène « rayons cosmiques » :





# RAPPEL IMPORTANT N°1 :

## UNITÉ du phénomène « rayons cosmiques » :



Étude cruciale de la **transition galactique/extragalactique**

=> spectre mou des **protons extragalactiques** ou composante supplémentaire  
=> sources de **protons galactiques** jusqu'à qq  $10^{16} \text{ eV}$

=> Renforcer les **mesures de composition** à la transition ! → Auger upgrade

=> Renforcer les **mesures au genou** ! → Point pivot vers les basses énergies ! → LHASO ?

# RAPPEL IMPORTANT N°2 :

## ★ Stratégie multi-messagers :

1) observations complémentaires d'un même type de sources via des canaux complémentaires

=> les 4 piliers sont potentiellement impliqués

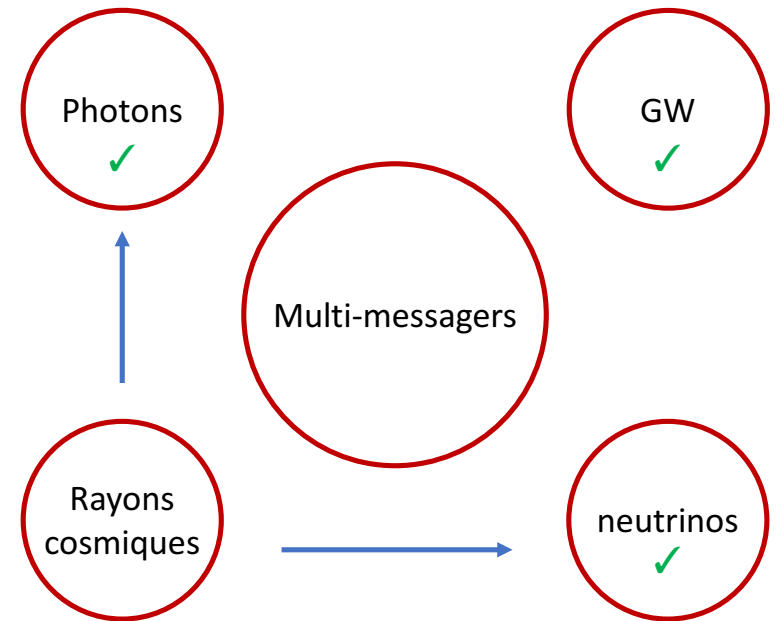
2) observation simultanée d'une source transitoire particulière via des canaux complémentaires

=> les rayons cosmiques ne sont pas impliqués !

3) compréhension de l'ensemble des fonds diffus interconnectés

=> rayons cosmiques, neutrinos et photons directement concernés !

Enjeu majeur : évolution cosmologique des sources => histoire de l'univers



# Un objectif majeur :

## la caractérisation des fonds diffus multi-messagers

★ Effet GZK : production de pions et de paires e+e- par les UHECRs (-> horizon)

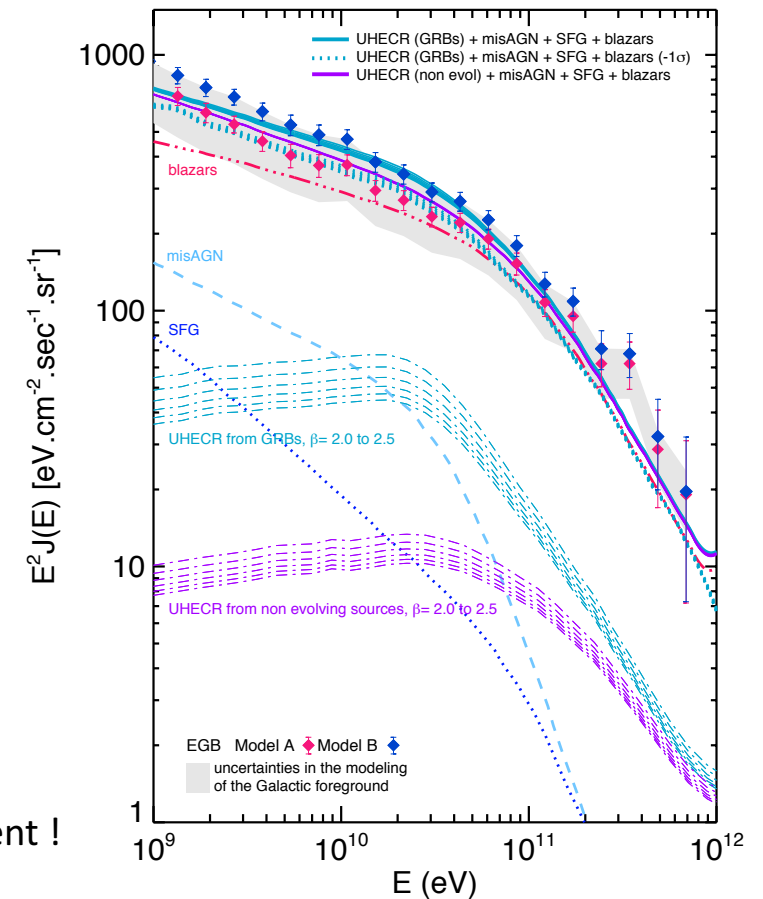
Les UHECRs interagissent avec les fonds diffus de photons : CMB et infrarouge

Les UHECRs produisent un fond diffus de photons (GeV) et de neutrinos

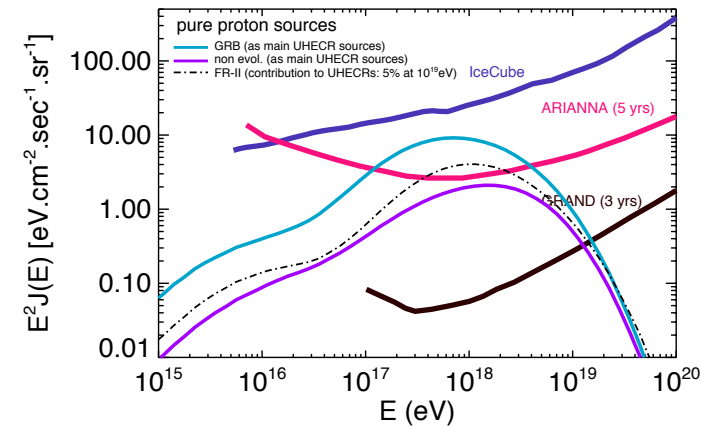
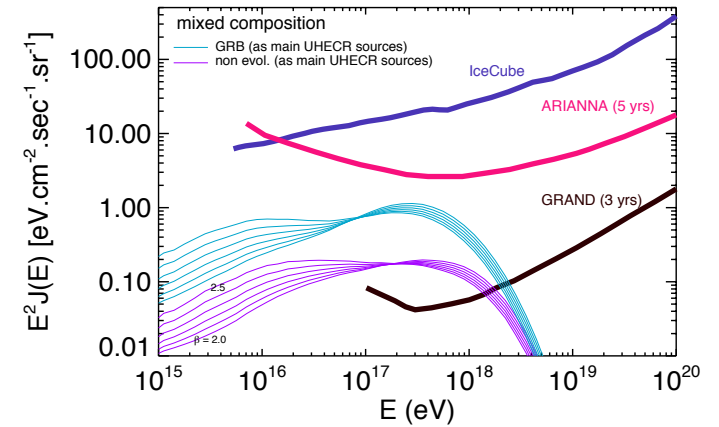
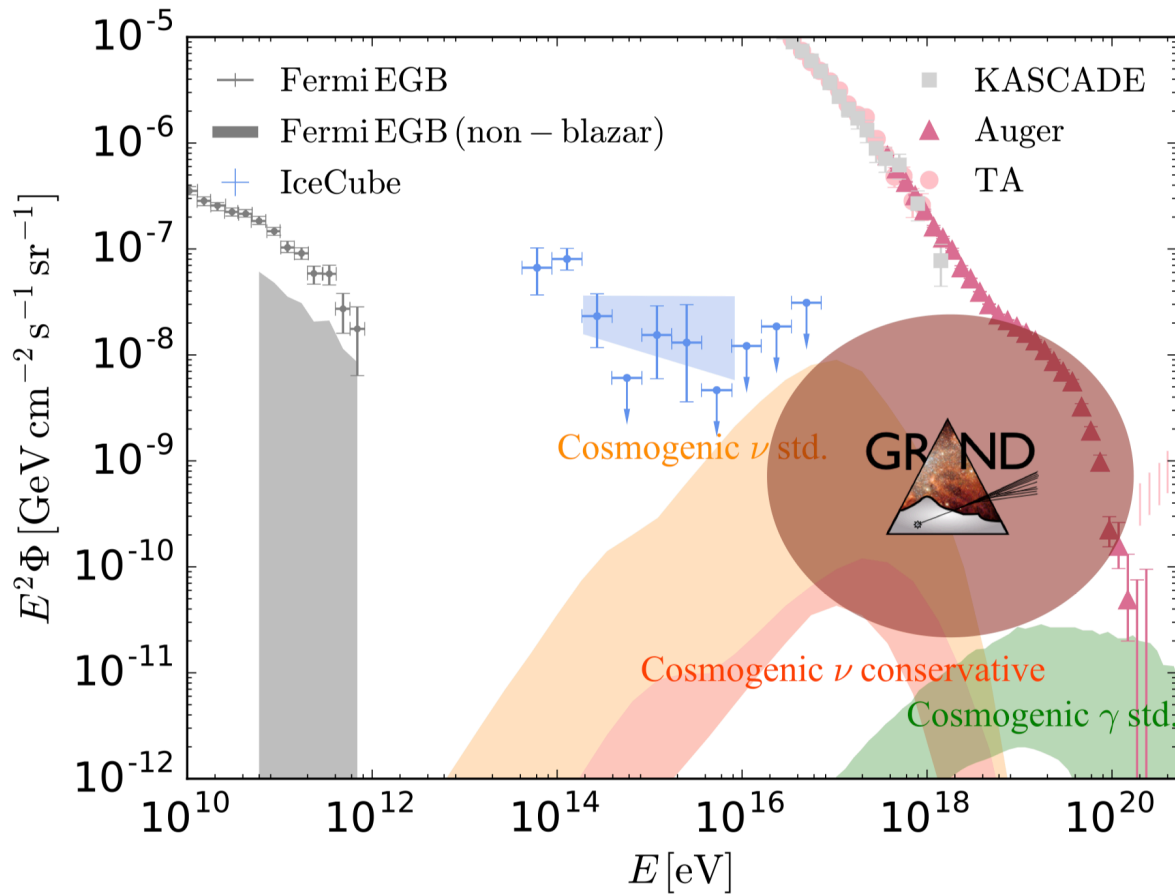
Les UHECRs sont un fond diffus extragalactique !

- Comprendre les contributions locales
- Comprendre l'évolution cosmologique
- Contraindre la densité de sources
- Distribution en luminosité

Les neutrinos cosmogéniques sont un enjeu majeur pour les 20 ans qui viennent !



# Un objectif majeur à moyen terme : la caractérisation des fonds diffus multi-messagers



# Enjeux prospectifs

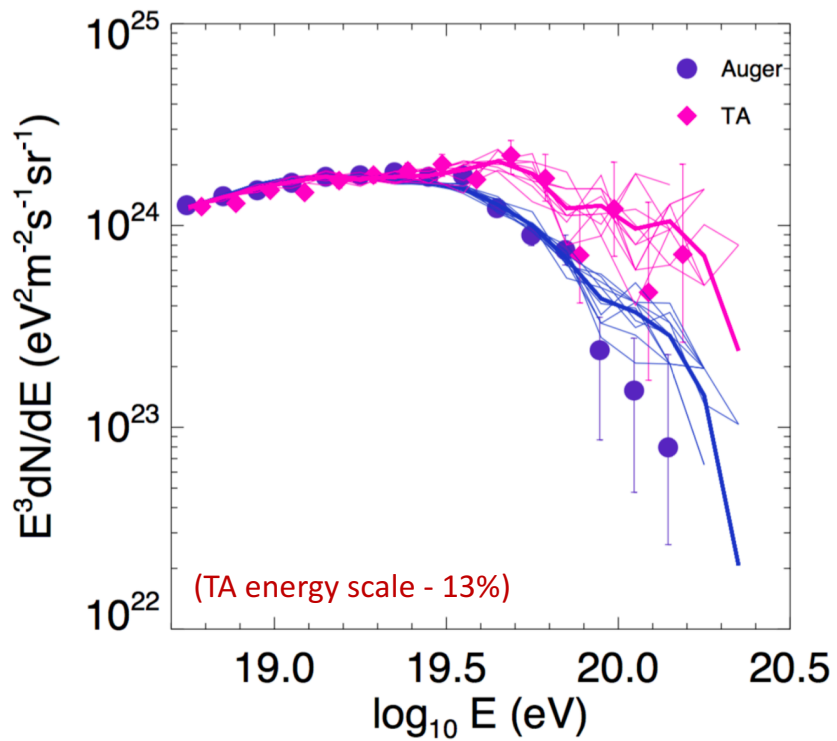
★ **Data, data, data** ! Aller chercher les UHECRs et les neutrinos associés !

# Enjeux prospectifs

★ **Data, data, data** ! Aller chercher les UHECRs et les neutrinos associés !

★ Élucider le **spectre d'énergie** :

Auger et TA **incompatibles à  $7\sigma$**  au dessus de 30 EeV !



Pas le même ciel ? (mais presque isotrope !?)

Pas les mêmes systématiques !

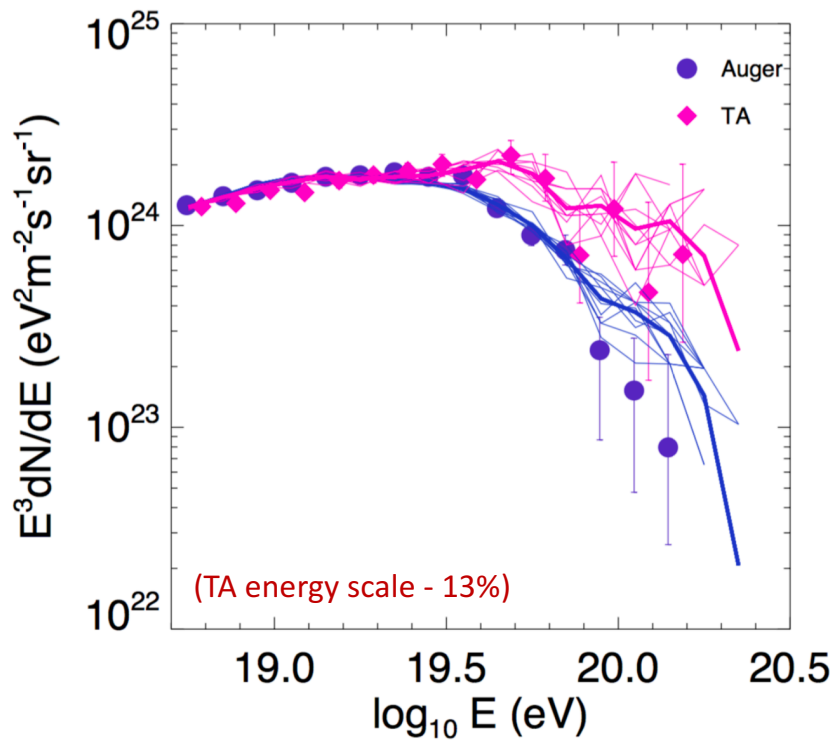
=> Atout majeur d'un **instrument spatial** !

# Enjeux prospectifs

★ **Data, data, data** ! Aller chercher les UHECRs et les neutrinos associés !

★ Élucider le **spectre d'énergie** :

Auger et TA **incompatibles à  $7\sigma$**  au dessus de 30 EeV !



Pas le même ciel ? (mais presque isotrope !?)

Pas les mêmes systématiques !

=> Atout majeur d'un **instrument spatial** !

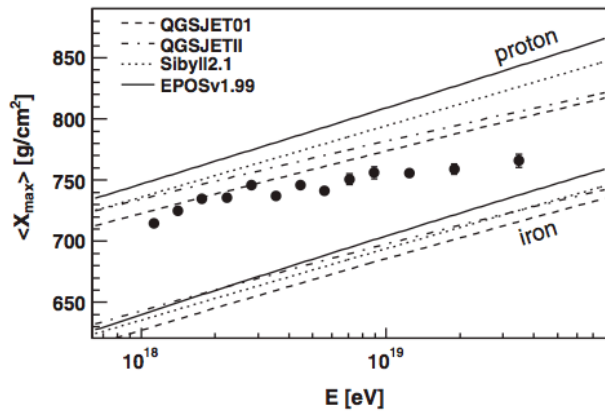


(NB: GRAND aura aussi une couverture à cheval sur les hémisphères)

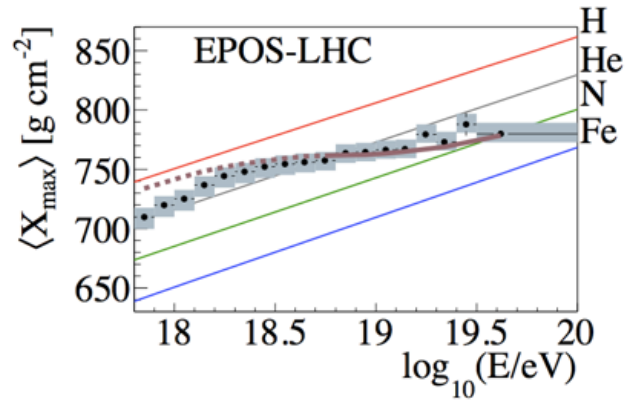
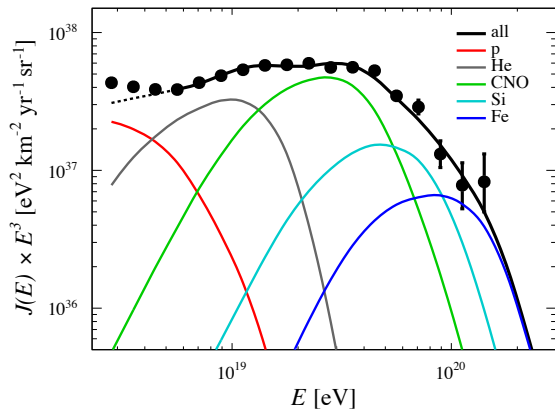
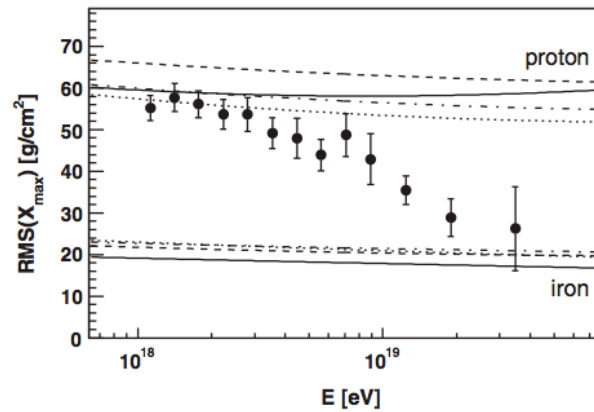
# Enjeux prospectifs

★ Mesurer la **composition** : Transition à UHE : **le** résultat majeur d'Auger !

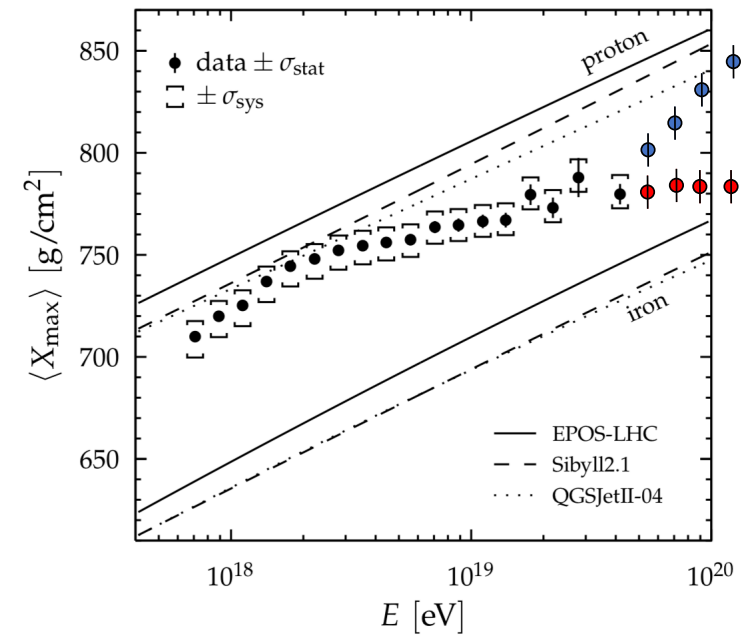
AVERAGE  $X_{\max}$



SPREAD of  $X_{\max}$



Quelle composition aux énergies extrêmes ?



=> espace : 10 x Auger = 100 x Auger fluo



# Enjeux prospectifs

- ★ Comprendre les **anisotropies** : Premières anisotropies détectées par Auger et TA  
Dipôle ( $\approx 8$  EeV) + warm spot ( $> 40$  EeV)

Mais aucune indication significative sur les sources, ni même leur nature.

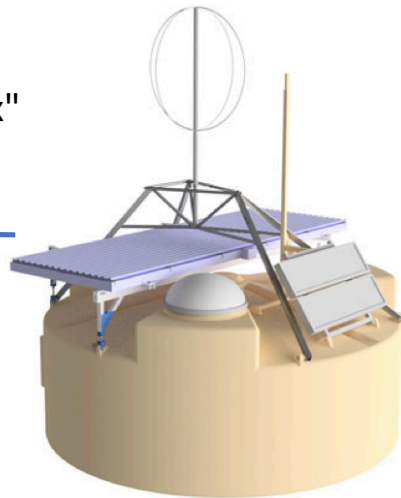
=> Il est **possible** de sortir du brouillard magnétique !

**Reste à le faire !** (Et à en tirer quelque chose d'instructif !)

- ★ Stratégies complémentaires :

**Auger prime** :  
réduire le "bruit de noyaux"

Scintillateurs  
(séparation  
EM, muons)

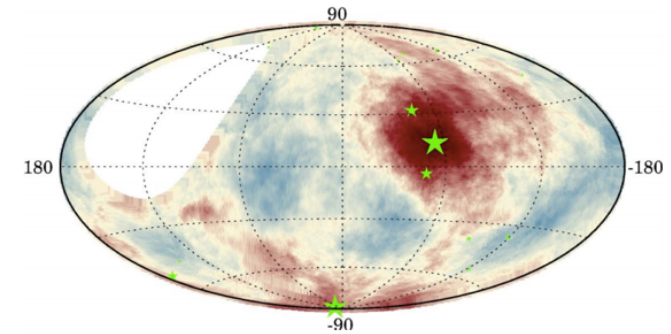
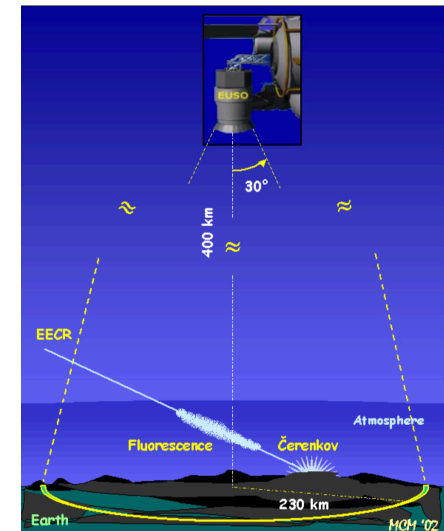


NB: a priori pas de protons UHE, mais p-ê composante lointaine et rare (au-delà de l'horizon)

**EUSO/espace** :  
- augmenter le signal  
(acceptance  $\times > 10$ )

- réduire le "bruit de ciel"

(énergies extrêmes :  
quelques sources seulement)

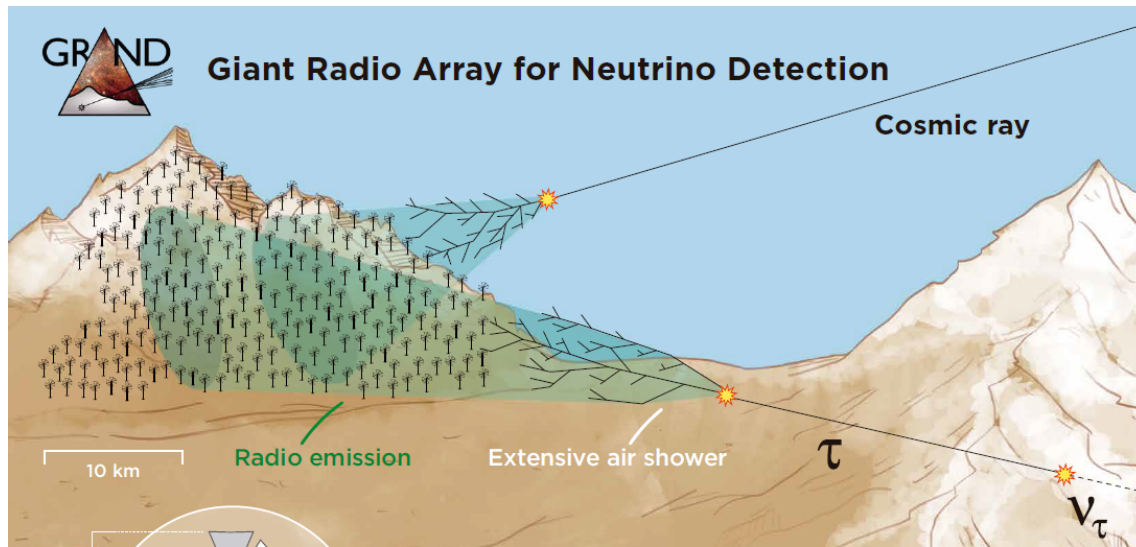


# Enjeux prospectifs

★ Aller chercher les **neutrinos cosmogéniques** :

Élément incontournable de la phénoménologie des UHECRs !

Lien avec l'évolution cosmologique et la composition !

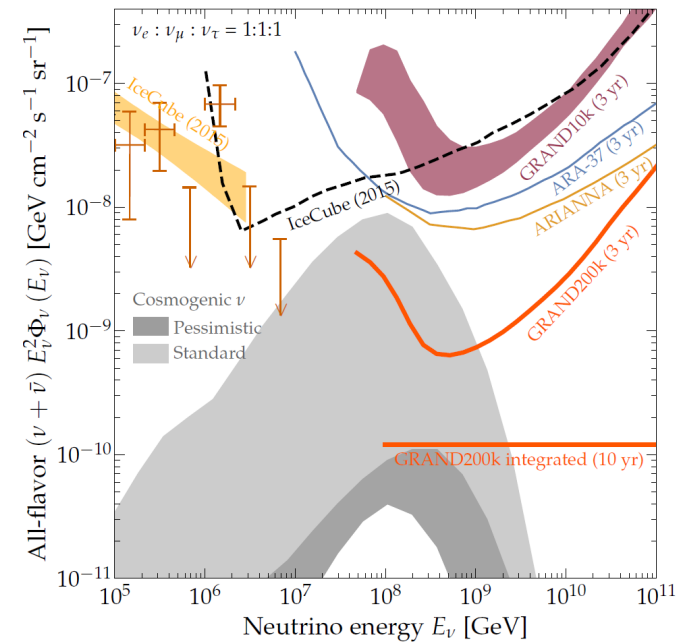


Pas de bruit (tous les neutrinos sont du signal !)

Faire émerger le signal !

Requiert un détecteur couvrant un volume gigantesque

=> GRAND

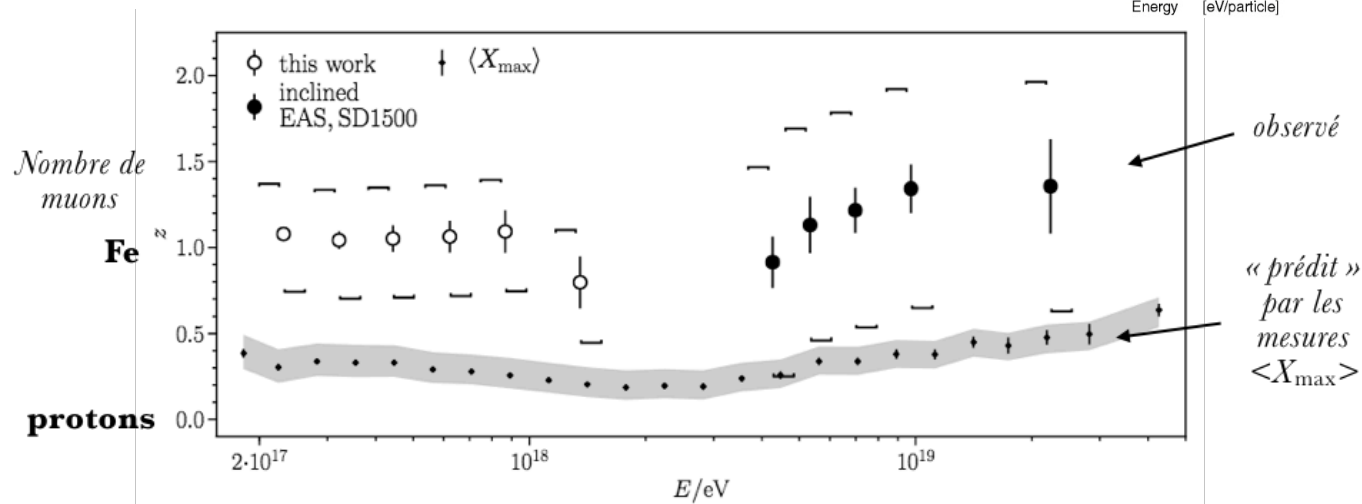
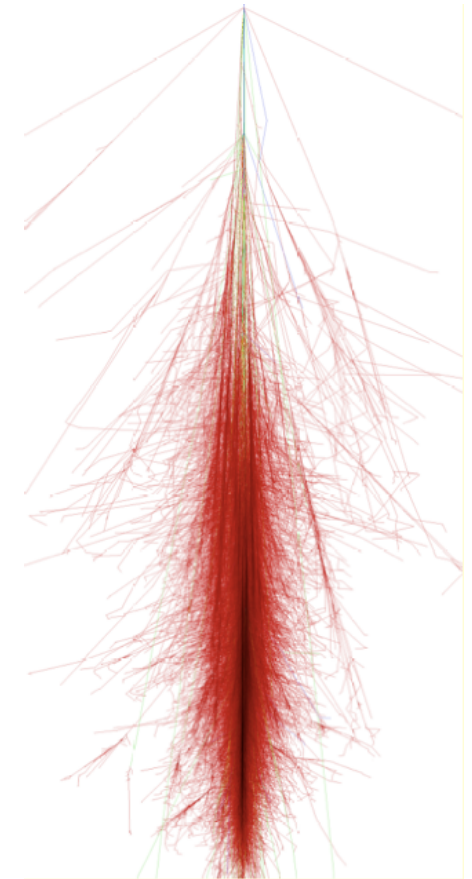
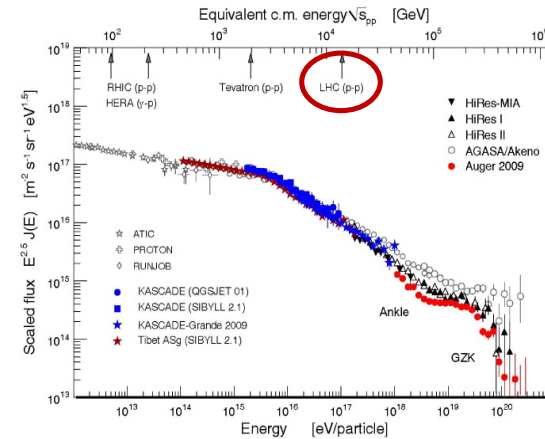


# Enjeux prospectifs

## ★ Physique des gerbes :

Physique des particules, complémentaire au LHC !

Anomalie hadronique : muons



- Composante  $\mu$  provenant d'un processus en cascade en plusieurs étapes, principalement par les interactions des pions et des kaons secondaires
- Nombreux paramètres extrapolés aux énergies d'intérêt

**Auger prime** : par mesure directe des composantes muon et EM individuelles

**GRAND** : par comparaison (mesure de composante EM seule)

# Où est on ? Où va-t-on ?

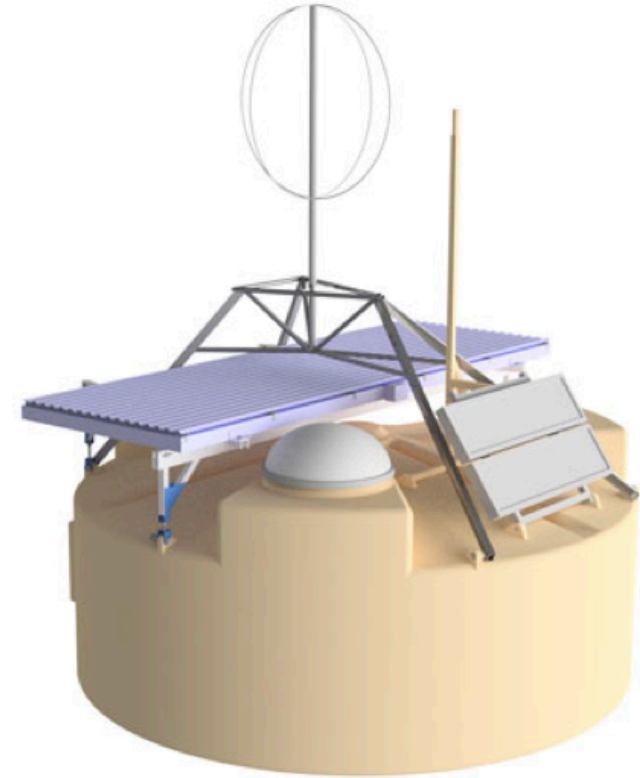
## ★ Auger prime

Développement de l'upgrade en cours.

Exploitation à partir de 2025.

- Déterminer les composantes e.m. et muoniques grâce à l'ajout de scintillateurs, d'antennes MHz et d'une nouvelle électronique de lecture
- Nouvel éclairage sur les processus hadroniques aux énergies d'intérêt, visant à fournir des éléments permettant de comprendre les gerbes atmosphériques
- Meilleure compréhension des paramètres sensibles à la composition des rayons cosmiques aux énergies extrêmes
  
- Séparer la masse moyenne sur des cartes du ciel filtrées à une échelle angulaire donnée
- Combiner les données d'intensité directionnelle avec les données de composition directionnelle

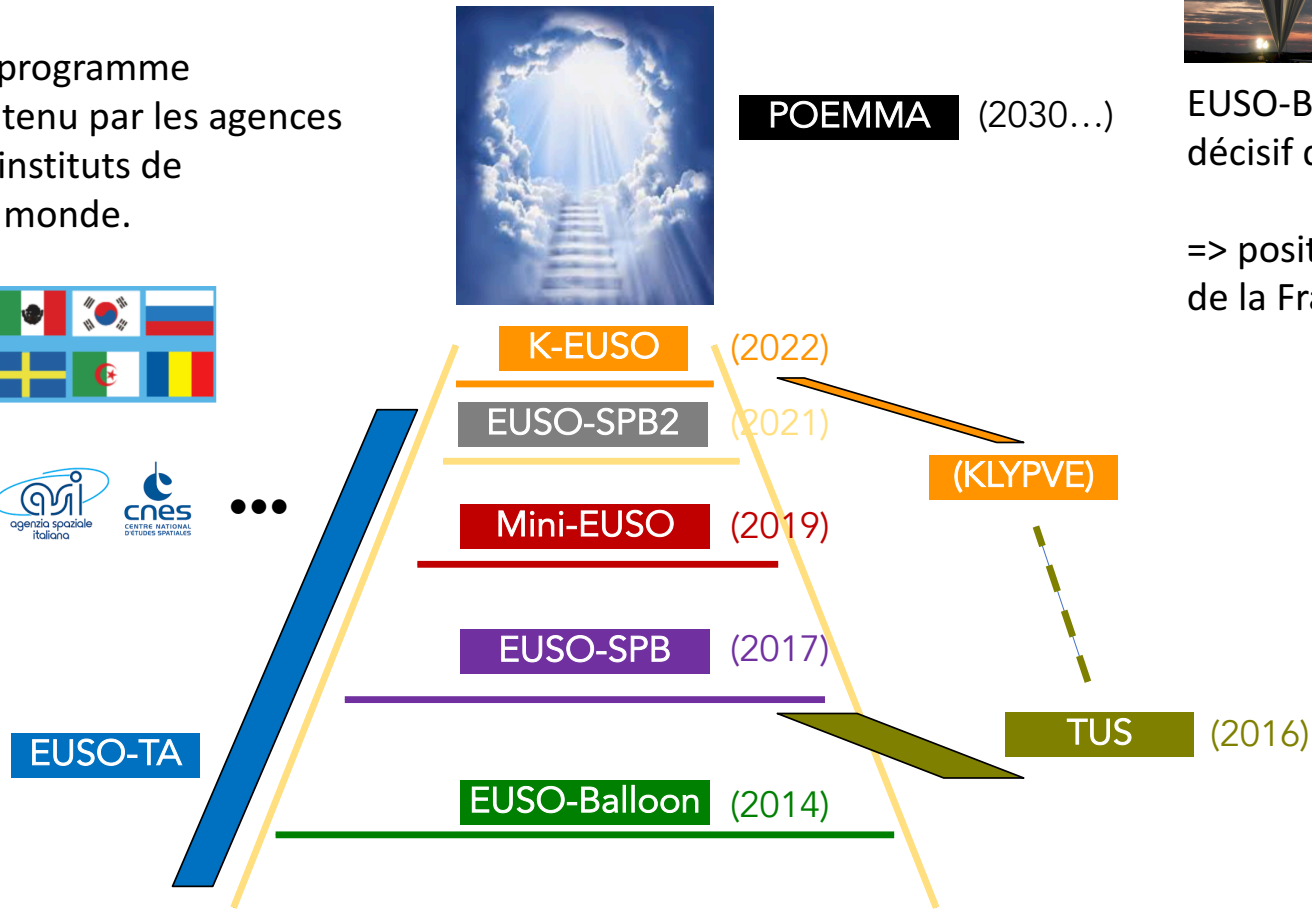
(non-uniformités de l'intensité directionnelle façonnées par les éléments plus légers ?)



# Où est on ? Où va-t-on ?

## ★ Espace (programme JEM-EUSO)

Développement d'un programme international, très soutenu par les agences spatiales et les divers instituts de recherche à travers le monde.



EUSO-Balloon : lancement décisif des missions EUSO

=> position privilégiée de la France

# Où est on ? Où va-t-on ?

★ GRAND :

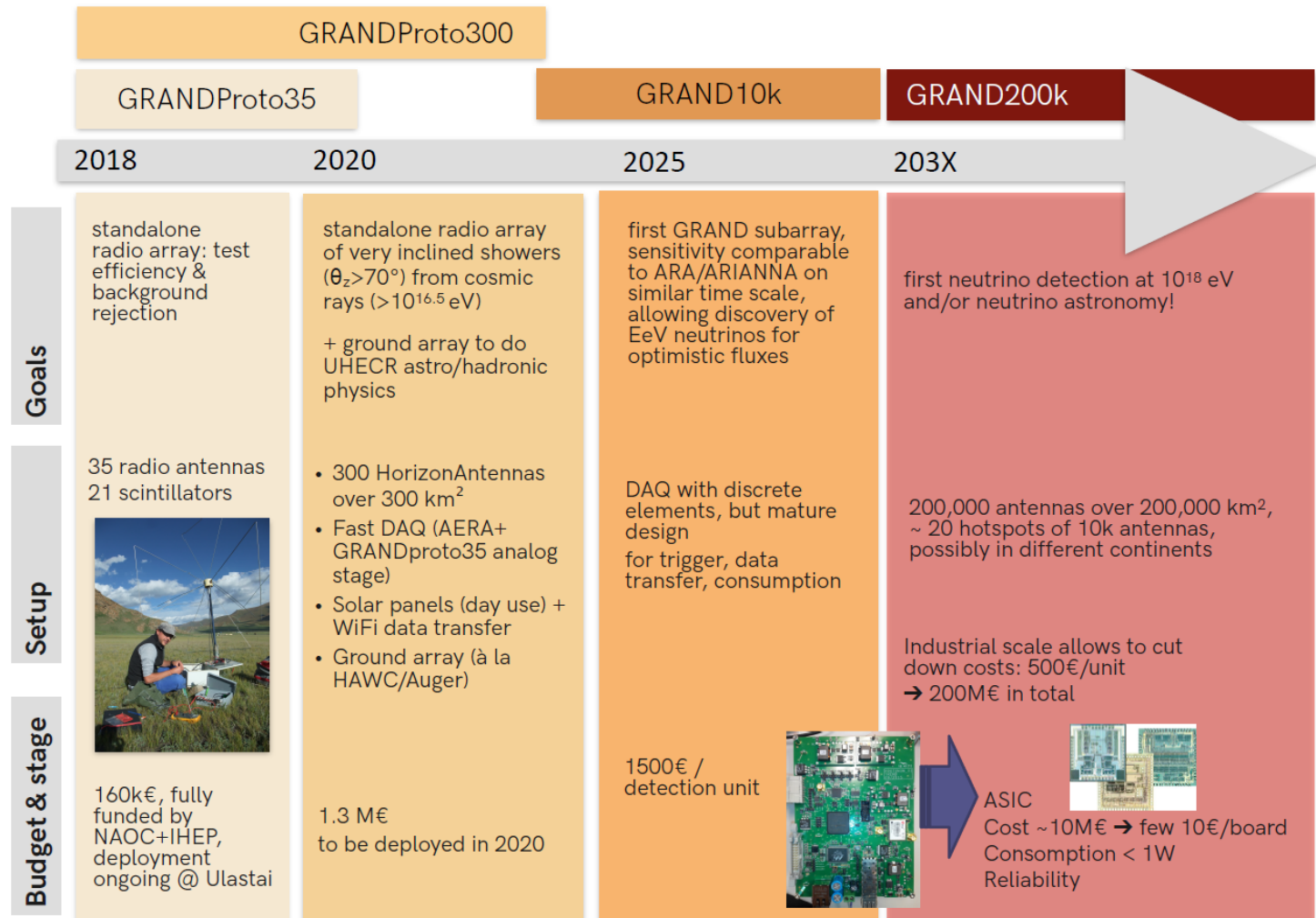
Étape clé : GRAND Proto300

+ détecteurs de surface !

Neutrino UHE = *terra incognita*

Exploration majeure, à ne pas manquer

Lien entre les autres messagers, avec la composition et avec l'évolution cosmologique





# Théorie et phénoménologie : leadership français

- ★ Premiers à comprendre l'importance **des noyaux UHE** pour la phénoménologie des UHECRs  
(NB: avant les résultats d'Auger !)
  - ★ Premiers à comprendre l'importance de la **transition galactique/extragalactique** et des mesures de composition dans ce domaine
  - ★ Premiers à explorer systématiquement les flux de **neutrinos cosmogéniques** et leur dépendance vis-à-vis des modèles astrophysiques et cosmologiques
  - ★ Premiers à comprendre la production de **spectres différenciés** protons (mous) / noyaux (durs)
  - ★ Leaders mondiaux de la **propagation des UHECRs** : dans l'espace des énergies, des masses (composition), et géométrique (déflexions magnétiques)
  - ★ **Moyens numériques complets** : **Accélération** des particules, **propagation**, production de particules secondaires : neutrinos + photons (**cascades électromagnétiques**), déflexions, simulation de **cartes du ciel** réalistes à partir de **scénarios astrophysiques** très variés, analyse des **anisotropies**
- => La communauté française prête à **tirer pleinement parti des données à venir** !
- ★ NB: Participation active aux « **science cases** » d'Auger et de JEM-EUSO





# Atouts majeurs et complémentarité

[Data ! Data ! Data !]

- ★ Espace (EUSO et seq.) **Couverture complète du ciel** (résolution du "conflit" Auger vs. TA)  
Focus sur les **UHE** (« dans la coupure GZK ») : sources individuelles  
Gain d'**acceptance** considérable → anisotropies à l'extinction du flux  
**Composition moyenne** : les derniers points ! [ + nucléarites (q-balls) + météores + atmosphère, etc.]
- ★ GRAND (radio) Découverte des **neutrinos cosmogéniques**, fonds diffus  
Astronomie **sources ponctuelles** (transitoires ?) [ + Physique des gerbes avec « Proto300+ » ]  
Complément **UHECRs** et **composition**
- ★ Auger prime (sol) Recherche d'**anisotropies** et corrélations  
**Transition** galactique/extragalactique  
**Physique des gerbes**
- ★ Science des rayons cosmiques : « EGCRs et GCRs, **même combat** ! » [Leadership français !]
- ★ Astronomie multi-messagers : la **révolution du 21<sup>e</sup> siècle** : à compléter !

# Résumé

Mesurer les fonds

Aller chercher les sources

Mesurer la composition

Comprendre la transition

+ descendre au genou !

Physique des gerbes

Carte du ciel complète

Y a du travail !

Y a des travailleurs !

Y a des outils de travail !

+ position privilégiée des équipes françaises

- Prospective :**
- Préparer l'avenir
  - Tirer partie des positions favorables
  - Assurer une gestion intelligente et équilibrée de l'enveloppe