

Études comparatives des expériences auprès des réacteurs pour la mesure de θ_{13}

*Guillaume MENTION
CEA/Saclay*

*GdR Neutrinos
4 Octobre 2006*

Contenu

- 1) θ_{13} - les points clefs des expériences auprès de réacteurs
- 2) La physique commune
- 3) La comparaison

Double Chooz



Daya Bay



RENO



Angra



Quelle place reste-t-il pour la violation de CP dans le secteur des leptons ?

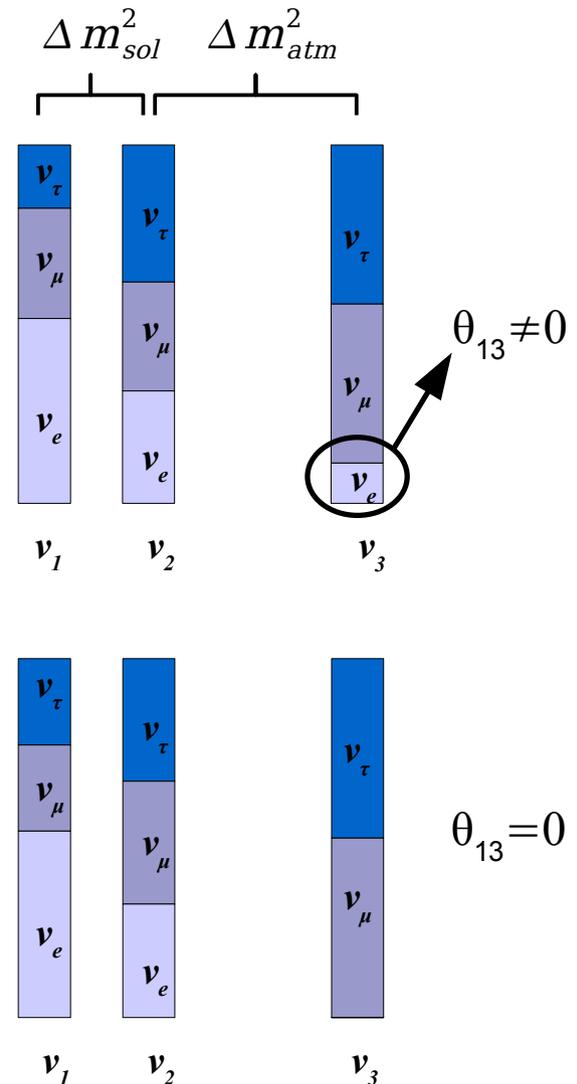
$$U_{\text{MNSP}} = U_{\text{atm}} \times \begin{pmatrix} \cos\theta_{13} & 0 & e^{-i\delta_{\text{CP}}}\sin\theta_{13} \\ 0 & 1 & 0 \\ -e^{i\delta_{\text{CP}}}\sin\theta_{13} & 0 & \cos\theta_{13} \end{pmatrix} \times U_{\text{sol}} \times U_{\text{Maj}}^{\text{diag}}$$

θ_{13} le dernier bastion de la matrice MNSP

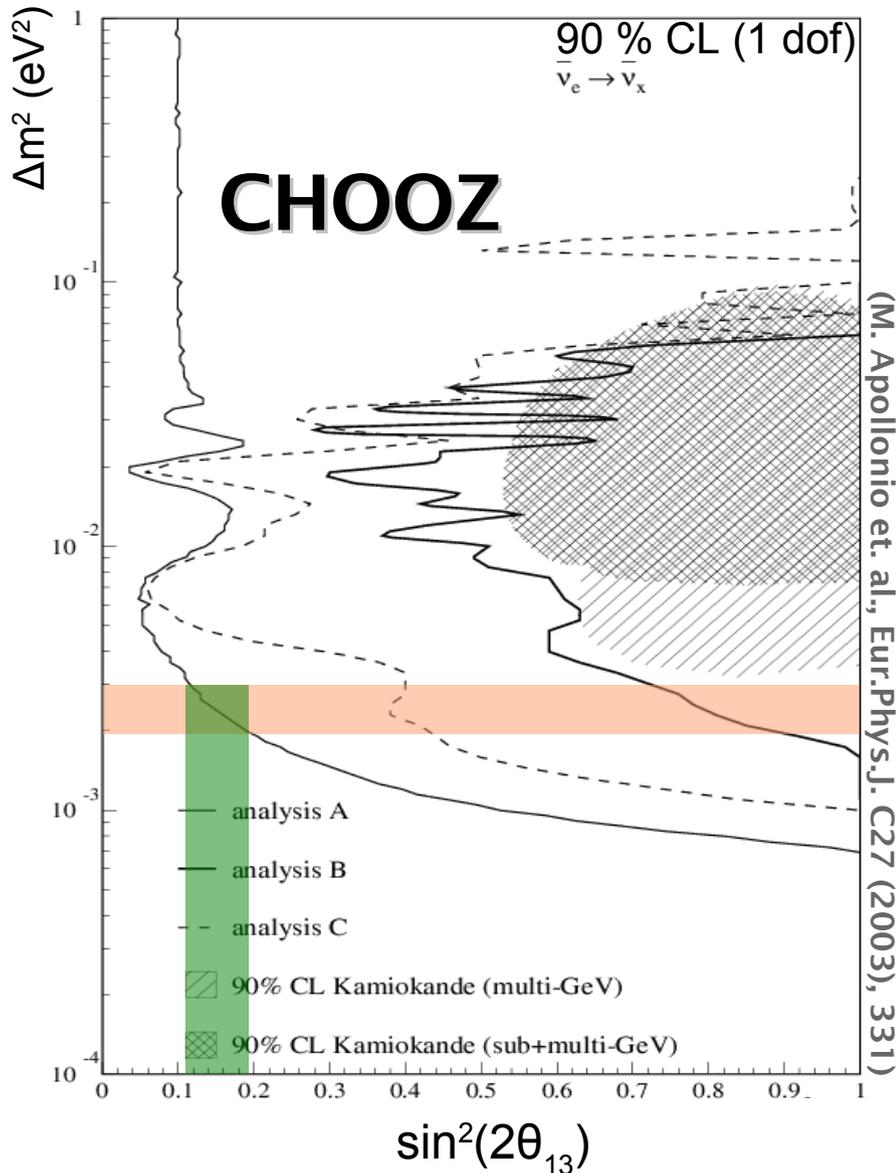
- Couplage : effets à 3 saveurs
- Effets violation CP, phase δ_{CP}

parameter	bf $\pm 1\sigma$	1 σ acc.	2 σ range	3 σ range
Δm_{21}^2 [10^{-5}eV^2]	7.9 ± 0.3	4%	7.3 – 8.5	7.1 – 8.9
$ \Delta m_{31}^2 $ [10^{-3}eV^2]	$2.5^{+0.20}_{-0.25}$	10%	2.1 – 3.0	1.9 – 3.2
$\sin^2\theta_{12}$	$0.30^{+0.02}_{-0.03}$	9%	0.26 – 0.36	0.24 – 0.40
$\sin^2\theta_{23}$	$0.50^{+0.08}_{-0.07}$	16%	0.38 – 0.64	0.34 – 0.68
$\sin^2\theta_{13}$	–	–	≤ 0.025	≤ 0.041

(Ajustement aux données globales, T. Schwetz, hep-ph/0606060)



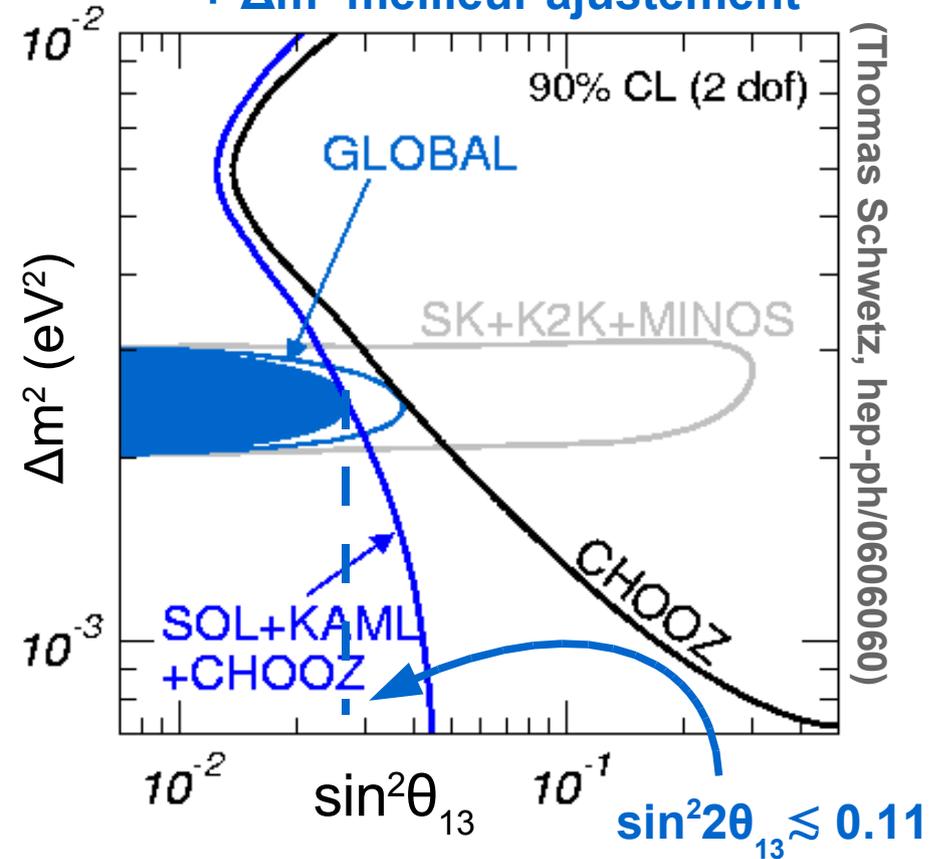
Dernières limites (90 % C.L.)



$\sin^2 2\theta_{13} \lesssim 0.12 - 0.20$

CHOOZ avec Δm^2 meilleur ajustement
 $\sin^2 2\theta_{13} \lesssim 0.14$

Analyses globales
 + Δm^2 meilleur ajustement

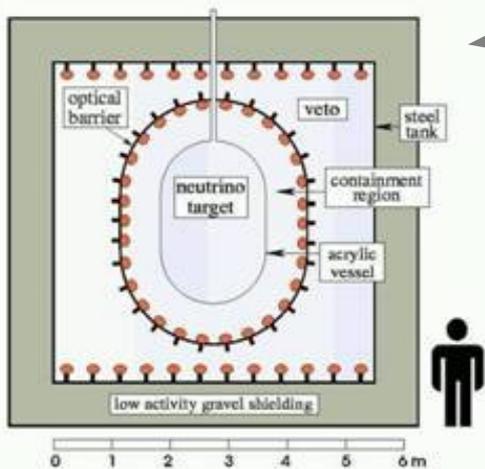
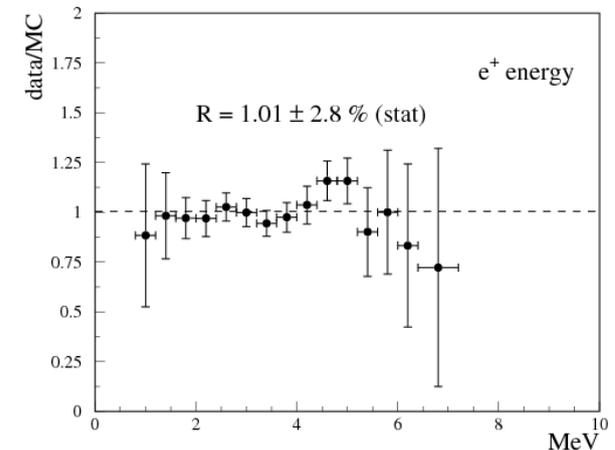
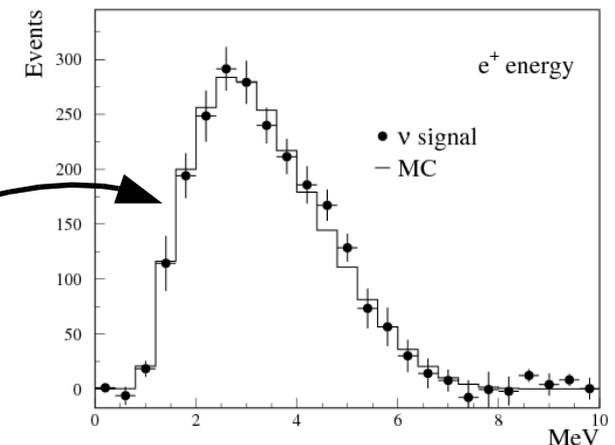


L'expérience CHOOZ



2 réacteurs : $P_{th} = 8,5 \text{ GW}_{th}$
 1 détecteur : $L = 1,051 \text{ km}$, $M = 5 \text{ t}$
 statistique : $\sim 2\,700$ événements ν

$\sim 1\,200 \nu$



$R = 1,01 \pm$
 $2,8\% \text{ (stat.)} \pm$
 $2,7\% \text{ (syst.)}$

Les améliorations en perspective

De CHOOZ aux prochaines expériences

- Erreur statistique : 2,8 % → $\leq 0,5$ %
- Connaissance des sources & détecteurs : 2,7 % → à mieux que 1%
- Connaissance des bruits de fond

Les approches choisies

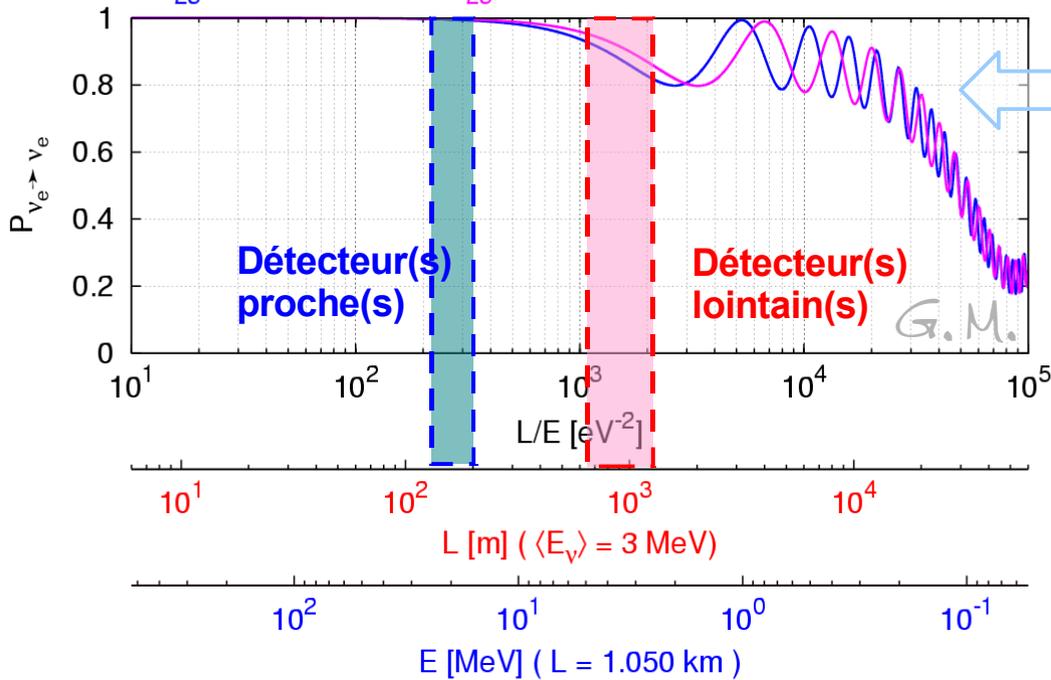
- Améliorer la statistique : durée, masse (\Rightarrow stabilité des liquides scintillants), puissance
- S'affranchir de la plupart des systématiques par comparaisons de détecteurs identiques (y compris multi-détecteurs/site pour réduire les incertitudes *relatives* c.f. Daya Bay)
- Amélioration de la conception des détecteurs (*guidé par le design de DC*)
- Concept de détecteurs mobiles « à la Bugey » (utilisation parallèle avec le concept multi-détecteurs/site) \Rightarrow confirmation requise.

Concept

$$P_{ee} = 1 - \sin^2(2\theta_{13}) \sin^2\left(\frac{\Delta m^2 L}{4E}\right)$$

$$\Delta m_{12}^2 = 7.2 \cdot 10^{-5} \text{ eV}^2; \cos\theta_{12} = 0.8; \sin\theta_{13} = 0.23$$

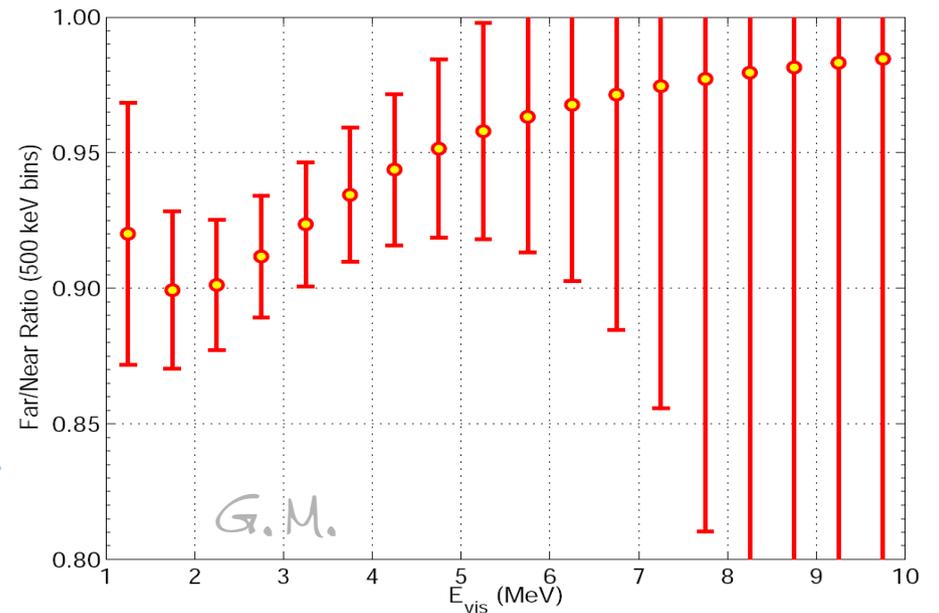
$$\Delta m_{23}^2 = 2.5 \cdot 10^{-3} \text{ eV}^2; \Delta m_{23}^2 = 2.0 \cdot 10^{-3} \text{ eV}^2$$



1. On s'affranchit des incertitudes liées aux sources de ν_e
2. On élimine un certain nombre d'incertitudes liées aux détecteurs

Déformation spectrale attendue (loin/proche) dans Double Chooz après 3 ans (erreurs stat. uniq.) si

$$\sin^2 2\theta_{13} = 0,1 \ \& \ \Delta m_{13}^2 = 2,5 \cdot 10^{-3} \text{ eV}^2$$



Hypothèse : pas de signal d'oscillation

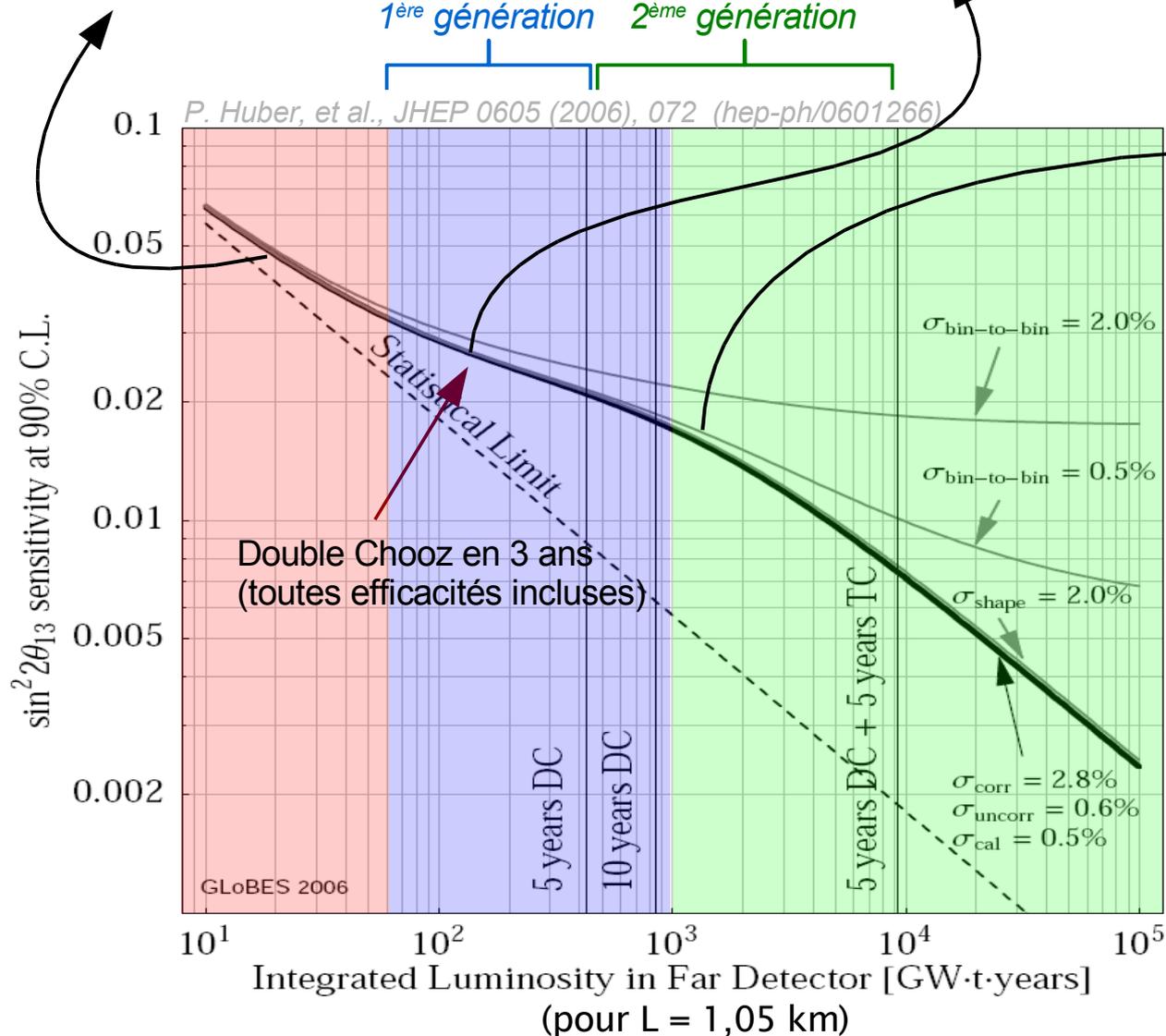
Sensibilité à 90 % C. L.

limité par la stat. sur le
taux d'événements

limité par les syst. sur les taux d'événements, et la stat.
sur la forme du spectre.

1^{ère} génération 2^{ème} génération

P. Huber, et al., JHEP 0605 (2006), 072 (hep-ph/0601266)



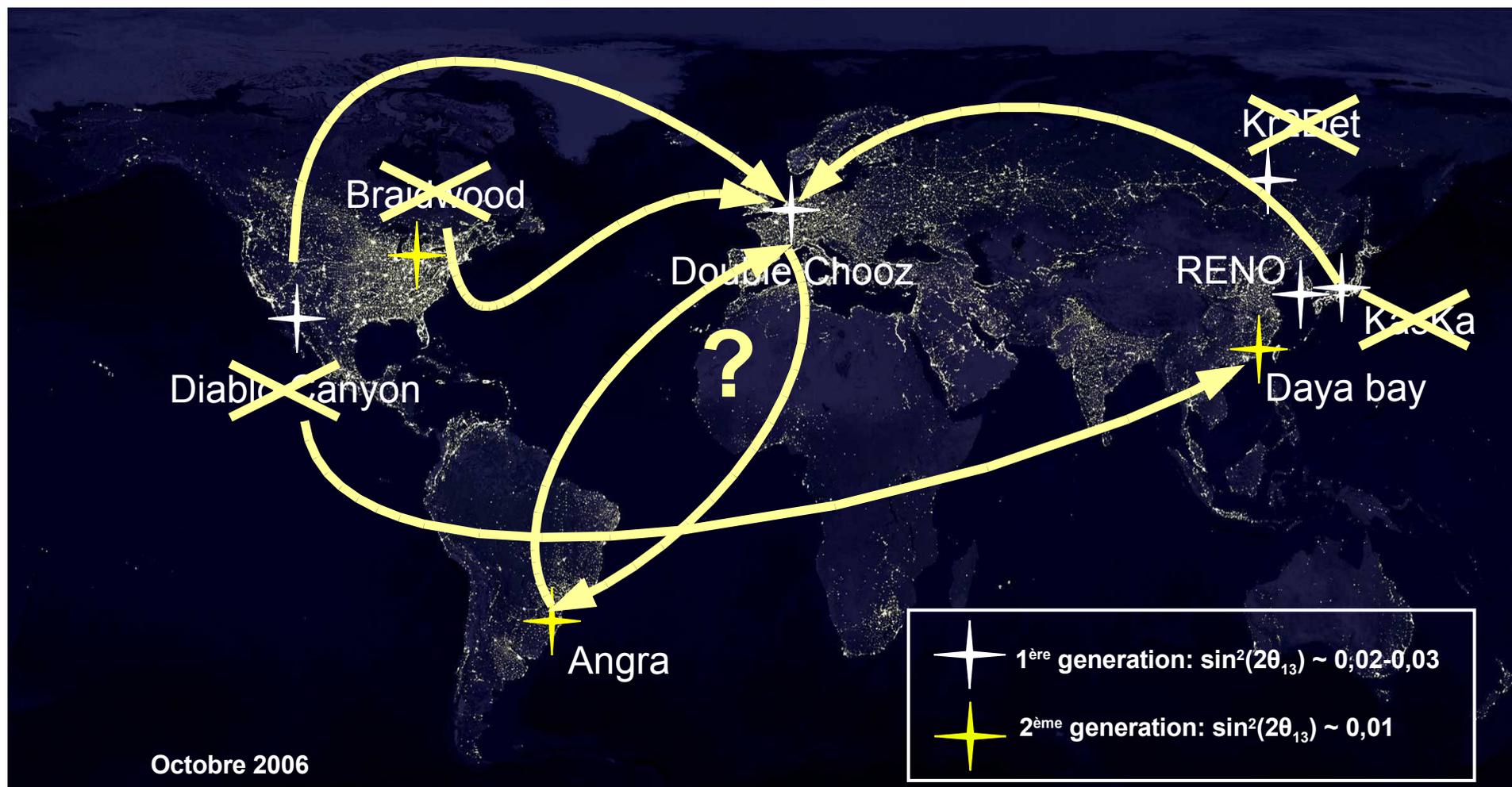
limité par les syst.
sur les taux
d'événements et
par les syst. sur la
forme spectrale
(étalonnage, bruits
de fond)

Remarque :

Calculs pour
le cas de
Double Chooz
($\sigma_{\text{nc}} = 0,6\%$)

Pas de géo-neutrinos, mais de la géopolitique

De 2001 à 2006, évolution du contexte mondial



Les expériences réacteur

site, puissance, distances, couverture, masse

1^{er} bilan

	Localisation	Puissance (en Gw_{th})	Distances (en mètres)	Couverture (en m équiv. eau)	Masse cible (en tonnes)	Nb d'événements rapportés à DC
Double Chooz	France	8,5	250/1050	80/300	8,3	1
Daya Bay	Chine	11,6/17,4(2010)	360/500/1750	260/910	2x20/2x20/4x20	7
RENO	Corée	17,3	150/1500	230/675	20	4
Angra	Brésil	2+4	~ 150/1500	~300/2000	50/500	10-20

1^{ère} génération

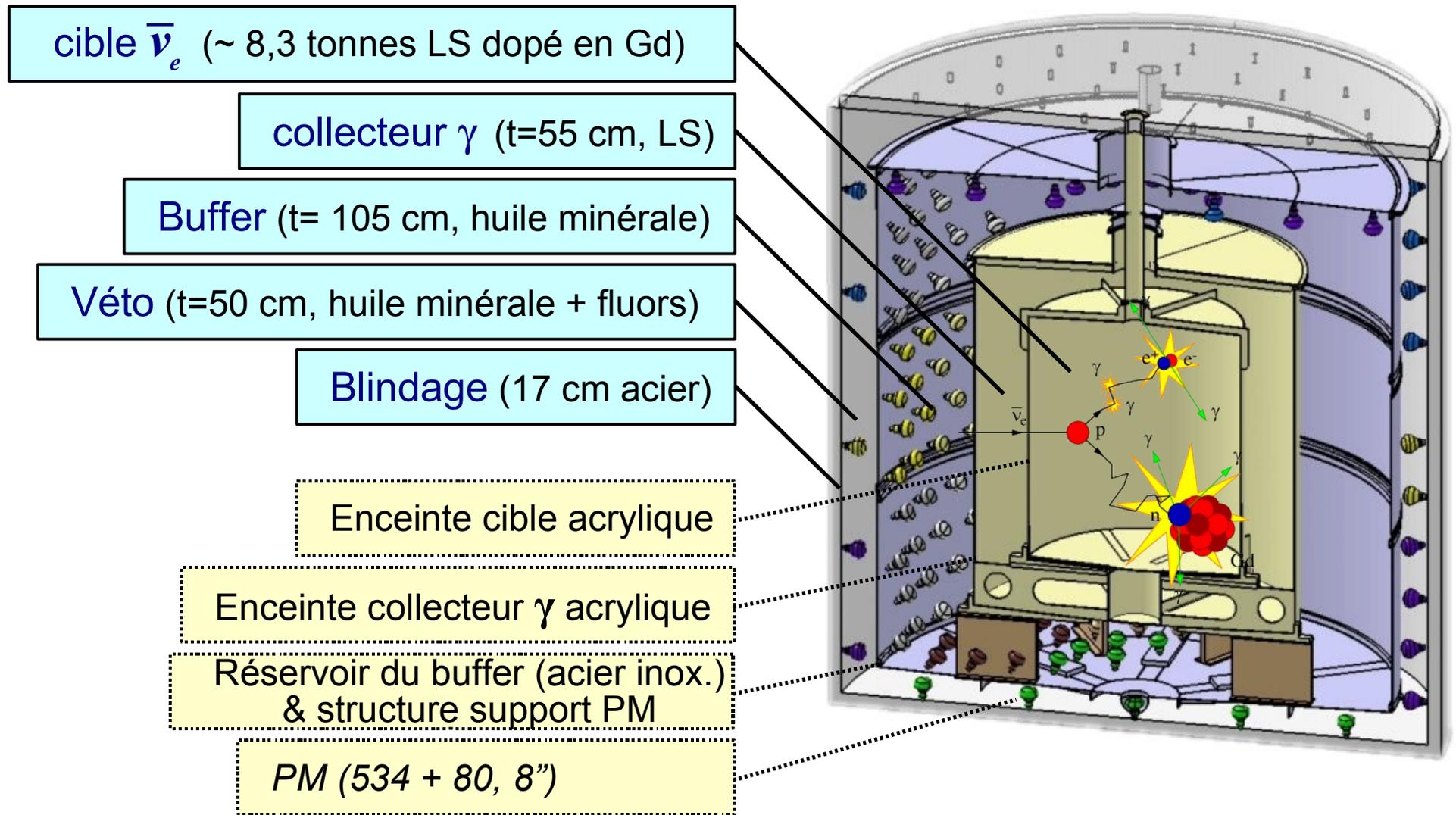
- Double Chooz
- RENO, Phase I
- Daya Bay, Phase I ?

2^{ème} génération

- Daya Bay, Phase II
- Angra

Conception des détecteurs

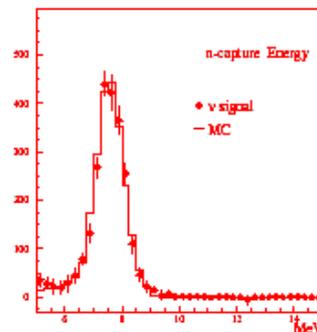
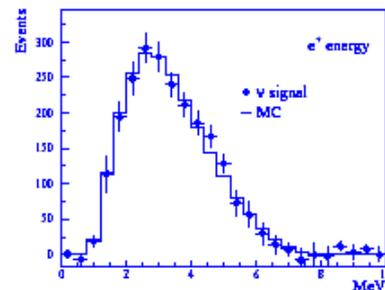
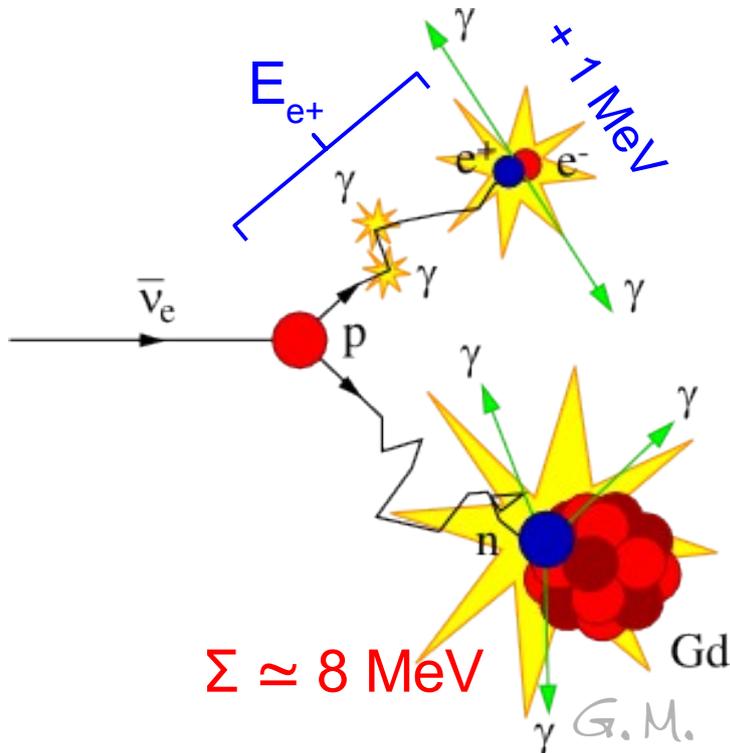
Tous les *projets réacteur* concurrents ont pour le moment adopté le *design* de Double Chooz



Le canal $\bar{\nu}_e \rightarrow \bar{\nu}_e$: *pur, simple mais toujours porteur (50 ans de physique...)*

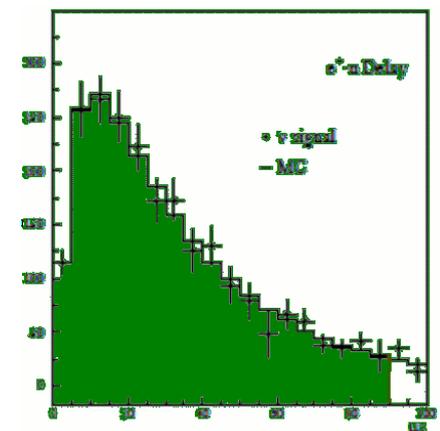
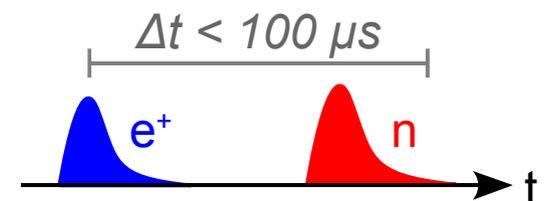
- Mesure « propre » de θ_{13} : $P_{ee} = 1 - \sin^2(2\theta_{13}) \sin^2\left(\frac{\Delta m^2 L}{4E}\right)$
- Identification des $\bar{\nu}_e$: *en coïncidence* (permet de réduire fortement les bruits de fond)

(1) $0,5 < E_{\text{immédiat}} < 10 \text{ MeV}$

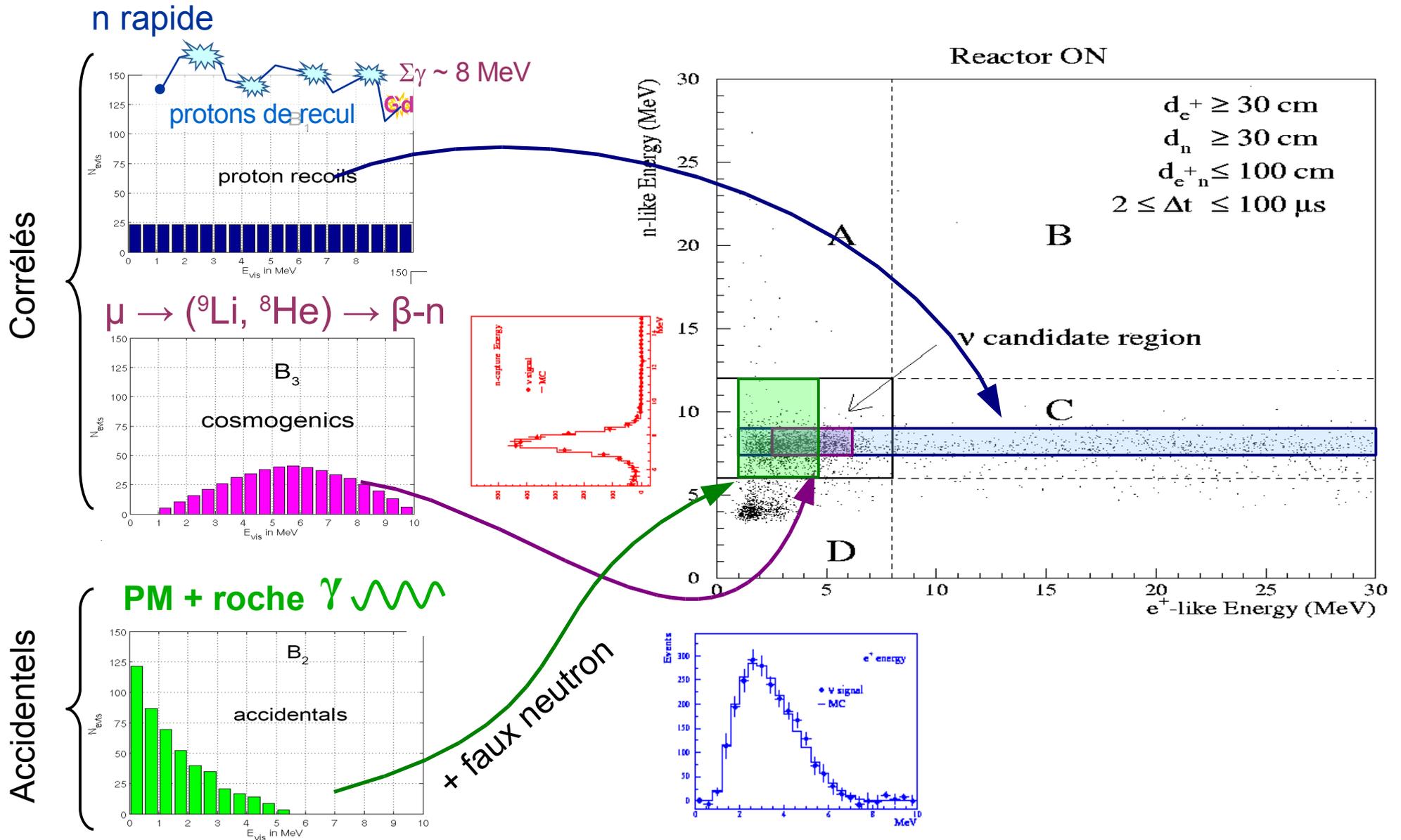


(2) $6 < E_{\text{retardé}} < 10 \text{ MeV}$

(3) $1 \mu\text{s} < \Delta t < 100 \mu\text{s}$



Le signal et les bruits de fond

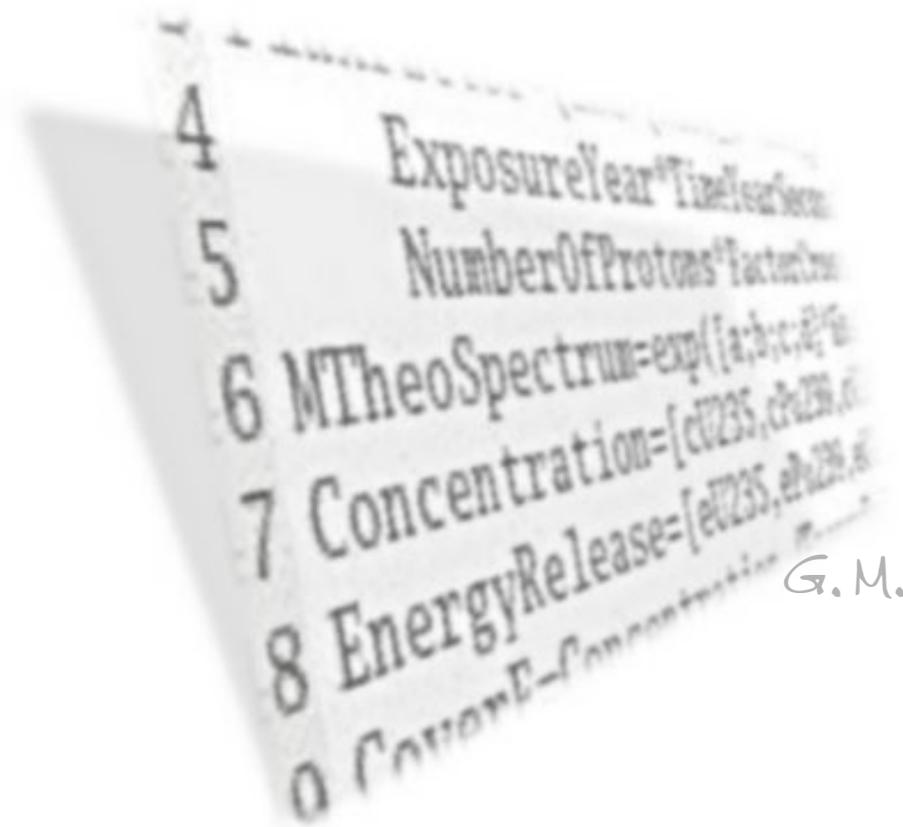


Comparaison des expériences

Code de simulation des expériences réacteurs

Prend en compte :

- Carte d'identité de chaque expérience
- Scénario d'installation
- Allumage/extinction des réacteurs/détecteurs
- Systématiques
 - réacteurs
 - détecteurs
 - bruits de fond
- Bruits de fond





Double Chooz



Site proche :
L ~ 280 m (~ 80 m équiv. eau)

Site loain :
L = 1 050 m en cours
d'aménagement ~ 300 m.é.e.

2 coeurs – 1 site – 8,5 GW_{th}

1 position proche, 1 loain

- cible : 2 x 8,3 t

Génie civil

- 1 puits proche ~ H 45 m, Ø 6 m

- 1 laboratoire disponible

Statistique (incluant ϵ)

- loain : ~ 50 évts/jour

- proche : ~ 550 évts/jour

Systematiques

- réacteur : ~ 0,2%

- détecteur : ~ 0,5%

Bruits de fond

- σ_{b2b} au site lointain : ~ 1%

- σ_{b2b} au site proche : ~ 0,5%

Planning

1. Détecteur lointain uniquement

- 2008-2009

- Sensibilité (1,5 ans) ~ 0,06

2. Détecteurs lointain + proche

- à partir de 2010

- Sensibilité (3 ans) ~ 0,025

G.M.



Double Chooz

Les systématiques

Error Source	Error Type	Error Description	CHOOZ Absolute	DC Absolute	DC Relative	
Reactor	Reactor					
		Production Cross Section	1.90%	1.90%		
		Core Powers	0.70%	0.70%		
		Energy per Fission	0.60%	0.60%		
Detector	Detector					
	Free H in TG	Detection Cross Section	0.30%	0.10%		
		Volume	0.30%	0.20%	0.20%	
		Fiducial Volume	0.20%	0.20%		
		Density		0.10%	0.01%	
	H/C (Chemical Composition)	0.80%	0.80%	0.10%		
Analysis	Electronics	Dead Time	0.25%		0.00%	
	Analysis					
	Particle Id	Positron	Escape	0.10%		
			Capture	0.00%		
	Neutron		Identification Cut	0.80%	0.10%	0.10%
			Escape	1.00%		
			Capture (% Gd)	0.85%	0.30%	0.30%
	Anti-neutrino		Identification Cut	0.40%	0.10%	0.10%
			Time Cut	0.40%	0.10%	0.10%
			Distance Cut	0.30%		
		Unicity (neutron multiplicity)	0.50%			
		Efficiency uncert due to bkg				
Total			2.90%	2.31%	0.46%	

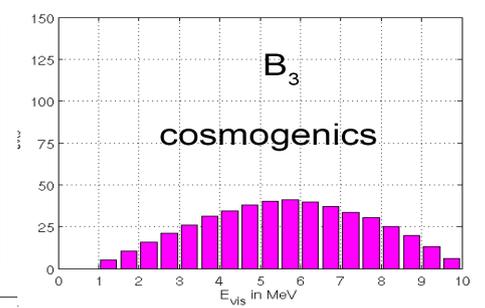
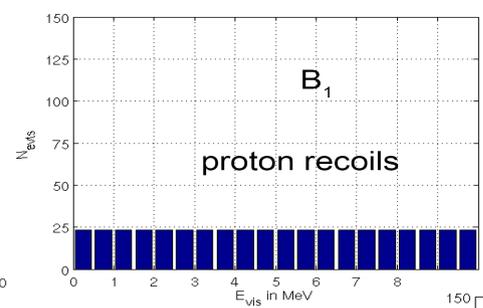
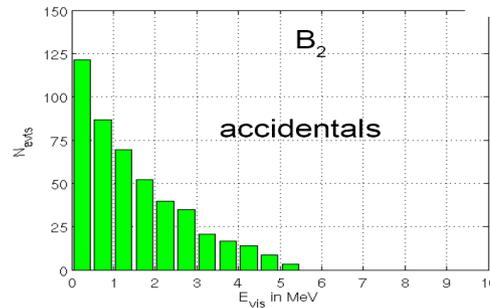


Double Chooz

Les bruits de fond

Corrélés

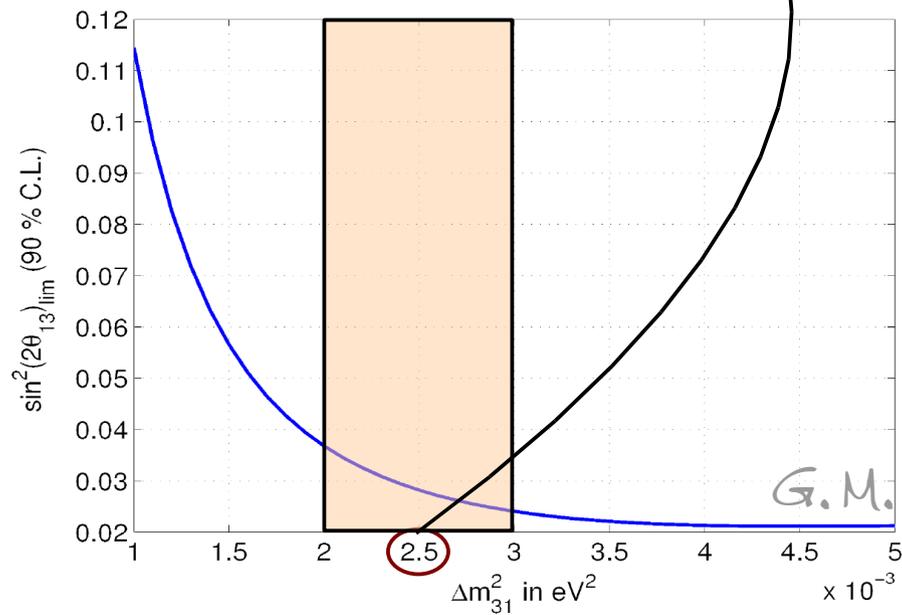
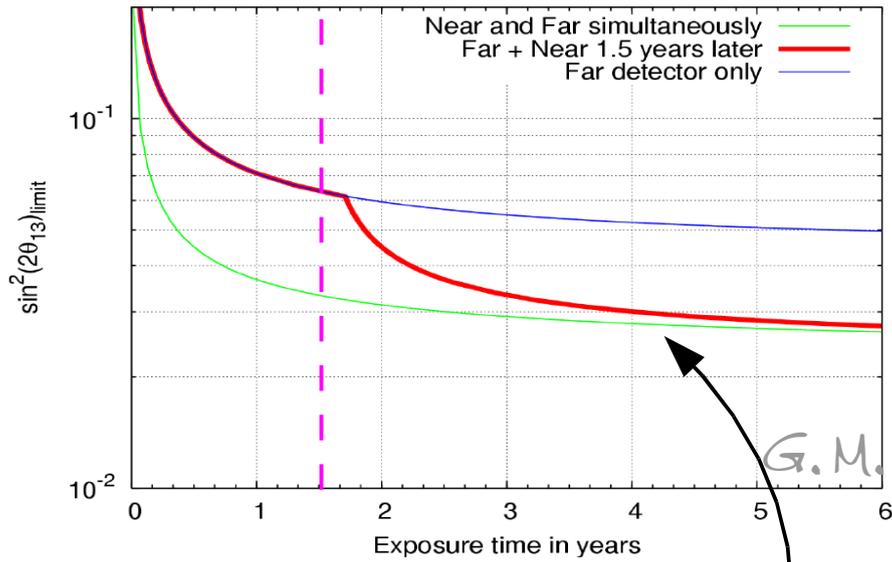
Accidentels



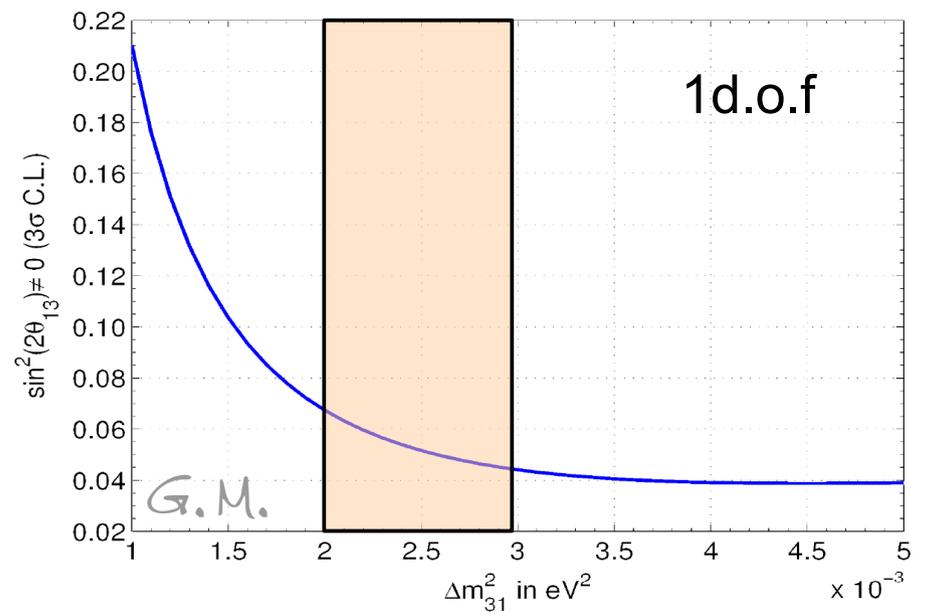
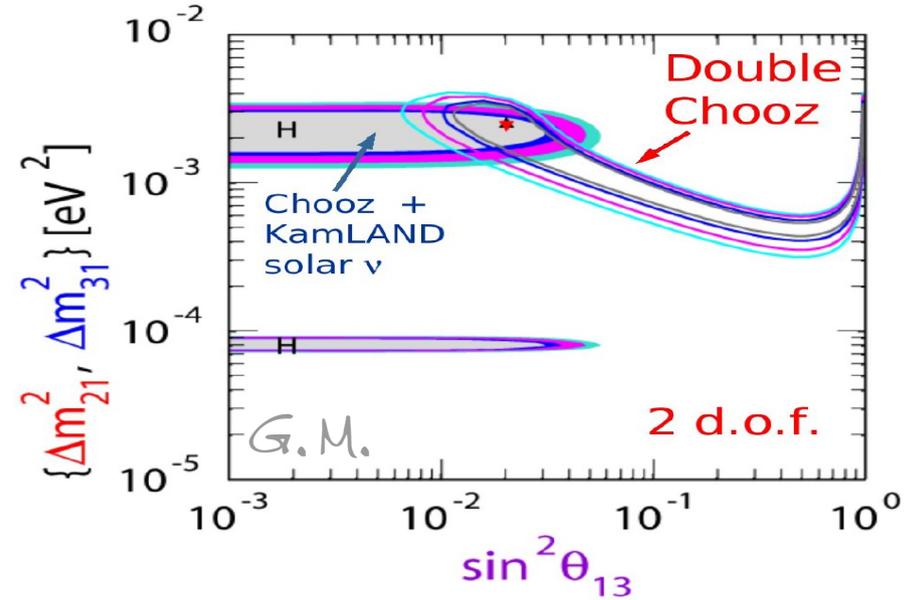
Bkg Type	Source	Double Chooz		Ratio bkg/nue	Systematics	Cumulated Ratio	Systematics (Name
		Rate (1/d)	Uncertainty					
Far Detector								
Accidentals	Neutrinos	69						
	Materials	1.00	0.10	1.45%	0.14%	2.90%	7.07%	B2f
	PMTs	1.00	0.10	1.45%	0.14%			
Correlated	Fast neutrons	0.15	0.15	0.22%	0.22%	0.83%	43.86%	B1f
	Muon capture	0.42	0.20	0.61%	0.29%			
	Li9-He8	1.00	0.50	1.45%	0.72%	1.45%	50.00%	B3f
Near Detector								
Accidentals	Neutrinos	990						
	Materials	7.20	1.00	0.73%	0.10%	1.45%	9.82%	B2n1
	PMTs	7.20	1.00	0.73%	0.10%			
Correlated	Fast neutrons	1.40	0.14	0.14%	0.01%	0.40%	30.20%	B1n
	Muon capture	2.60	1.20	0.26%	0.12%			
	Li9-He8	5.20	3.20	0.53%	0.32%	0.53%	61.54%	B3n

Sensibilité

18 months delayed scenario



Potentiel de découverte





Daya Bay



4 coeurs – 2 sites – 11,6 GW_{th}

⇒ 6 – 3 en 2011, avec 17,4 GW_{th}

2 positions proches, 1 intermédiaire, 1 lointaine

- loin : 4 modules de 20 t
- proche : 2 modules de 20 t chaque

Génie civil

- ~ 3,4 km de galeries
- 4 laboratoires à construire

Statistique

- intermédiaire : 80 évts/jour
- proche : 560 évts/jour

Modules mobiles ⇒ interchangeables (Théo.)

Systématiques

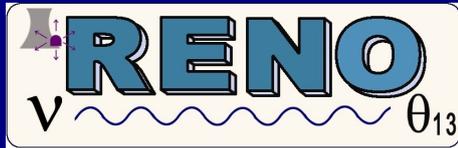
- réacteurs : ~ 0,1%
- détecteurs : ~ 0,2%

Bruits de fond

- B/S @ sites proches : ~ 0,5%
- B/S @ site loin : ~ 0,2%

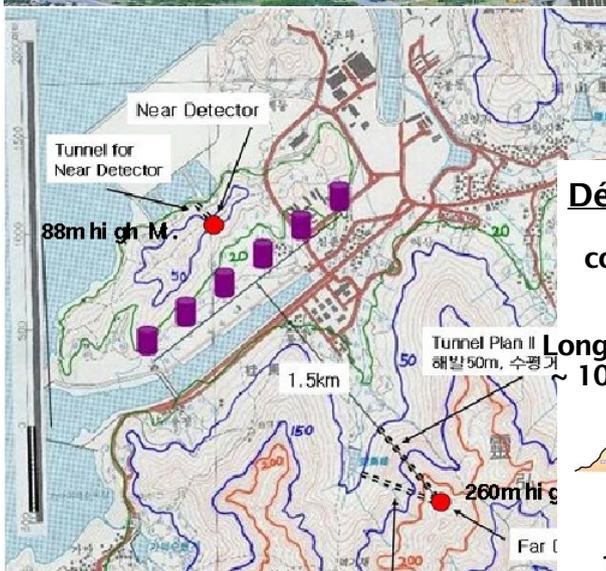
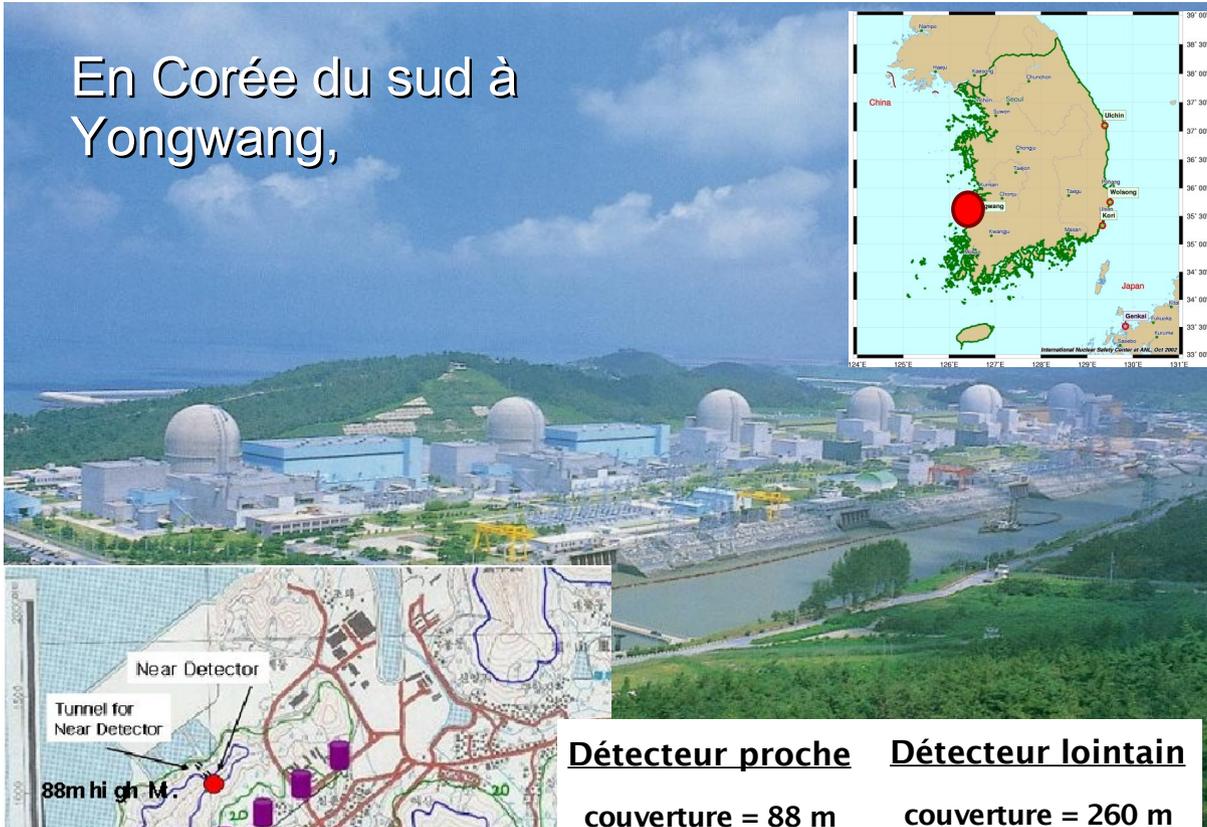
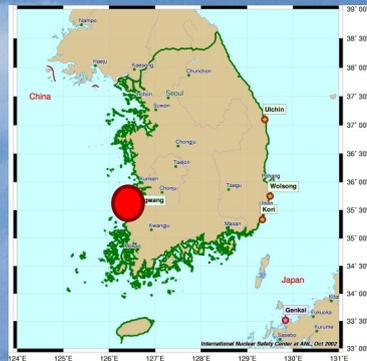
Planning

1. Mesure rapide (Phase I)
 - DYB+Intermed., 2008-2009
 - Sensibilité (1 an) ~ 0,03
2. Mesure complète
 - DYB+LA+Loin, à partir de 2010
 - Sensibilité (3 ans) < 0,01



RENO

En Corée du sud à
Yongwang,



Détecteur proche

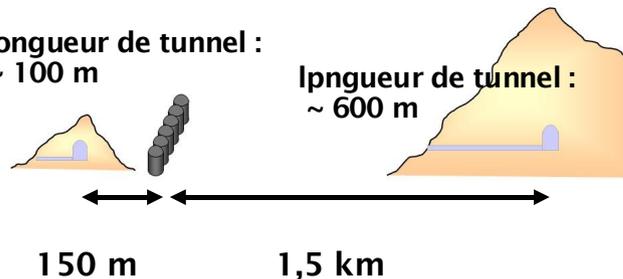
couverture = 88 m

Détecteur lointain

couverture = 260 m

Longueur de tunnel :
~ 100 m

Longueur de tunnel :
~ 600 m



6 cœurs – 1 site – 17,3 GW_{th}
1 position proche, 1 lointaine,
3 « très proche »

- cible : 2 x 20 t
- cible : 3 x ~ 200-300 kg

Génie civil

- ~ 700 m de galeries
- 2 laboratoires à construire

Statistiques

- loin : ~ 100 évts/jour
- proche : ~ 5000 évts/jour

Systématiques

- total : ~ 1%

Couverture

- loin : ~ 700 m.é.e.
- proche : ~ 240 m.é.e.

Planning

- Début de construction en 2007...
- Sensibilité : ~ 0,02



Angra

ANGRA dos Reis (Brésil)



1 t @ 50 m
50 t @ + 100 m (couv. : 100 m)
500 t @ 1,5 km (couv. 700 m)

1 réacteur disponible
+ 1 en construction

topographie adaptée pour une bonne
couverture rocheuse

très grande masse cible (~ 500 t)

but : sensibilité à la distorsion
spectrale

stratégie : acquérir de l'expérience
dans Double Chooz et envisager la
prochaine génération d'expérience au
Brésil.

sensibilité : < 0,01

Bilan global

- 2 expériences de première génération : **Double Chooz** et **RENO**
sensibilité ~ 0,02 à 0,03 (dépendant des systématiques, du Δm^2 des bruits de fond)
- 2 expériences de deuxième génération d'approche différente : **Daya Bay** et **Angra**
sensibilité visée 0,01.
- Descendre **au-dessous** de 0,01 semble **difficile** avec des expériences auprès de réacteur.

Bilan spécifique

Première génération

- **Double Chooz** : ~ 0,02-0,03
 - Peu de réacteurs, bonne puissance relative. Couverture rocheuse suffisante.
 - Position des détecteurs => insensible aux incertitudes sur la composition du combustible et la puissance des coeurs ; Bonne performance de la position du détecteur lointain (pour $\Delta m^2 > 2,5 \cdot 10^{-3} \text{ eV}^2$) pour 0,02-0,03.
 - Pour descendre en-dessous à 0,01, il faut aller plus loin...
- **RENO** : ~ 0,02-0,03
 - Bon site : couverture/puissance disponible.
 - Disposition des coeurs défavorable
 - Sensible aux incertitudes sur la puissance et la composition des coeurs (même avec 3 petits détecteurs de 200-300 kg).
 - => même avec 4 x plus d'événements que DC, même domaine de sensibilité que DC.

Bilan spécifique

Deuxième génération

- **Daya Bay** : ~ 0,01
 - Très bon site pour sa couverture rocheuse
 - L'atout de la puissance est un leurre (aussi bien avec les 2 coeurs de Daya Bay uniquement)
 - Le concept de multi-détecteurs/site permet de réduire l'incertitude non corrélée détecteur à détecteur d'un facteur $1/\sqrt{n_{\text{dét}}}$
 - Phase I ?
- **Angra** : ~ 0,01
 - Autre concept : 2 détecteurs de tailles différentes (50 t et 500 t).
 - Sensibilité fondée sur l'analyse en forme du spectre
 - Éventuellement possibilité de mesurer les bruits de fond *in situ*.