



Ecole de chronologie de la formation  
du système solaire IV (les Houches 2009)

Les météorites de Fer

Marc Chaussidon  
CRPG-CNRS, Nancy



- Introduction : description, classifications
- Les météorites de fer sont elles bien le résultat d'une différenciation métal-silicate ?
- Que peut on dire sur leurs corps parents ?
- Quand a eu lieu la différenciation ?
- Qu'est ce qu'on peut bien encore vouloir étudier avec les météorites de fer ?

- météorites de fer : Fe-Ni
  - rares parmi toutes les météorites ( $\approx 4\%$ )
  - 3 grands groupes pétrographiques
  - de 12 à 16 groupes chimiques
  - $\approx 14\%$  d'objets à part parmi les météorites de Fe ( $\approx 50$  autres groupes ?)
- pallasites : (pallasites + mésodidérites  $\approx 1\%$ )
  - association de forstérite et de Fe-Ni (souvent  $\approx 2/1$ )
  - au moins 2 groupes : main group et Eagle Station Trio (EST)
- mésosidérites :
  - mélanges de silicates (px, plagio -pas d'olivine-) et de Fe-Ni
  - mélange fait quand le métal était liquide et il y a  $\approx 4,5$  Ga (collisions entre planétésimaux, Vesta lien avec eucrites, mais pb avec taux de refroidissements lents ?)



Pallasite Imilac



Mesosiderite Vaca Muerta

## Les trois grands groupes pétrographiques : hexahédrites, octahédrites & ataxites

Ces différences proviennent des variations de concentration en Ni et Fe et des différences de structure cristalline entre la kamacite (riche en Fe) et la taenite (riche en Ni).

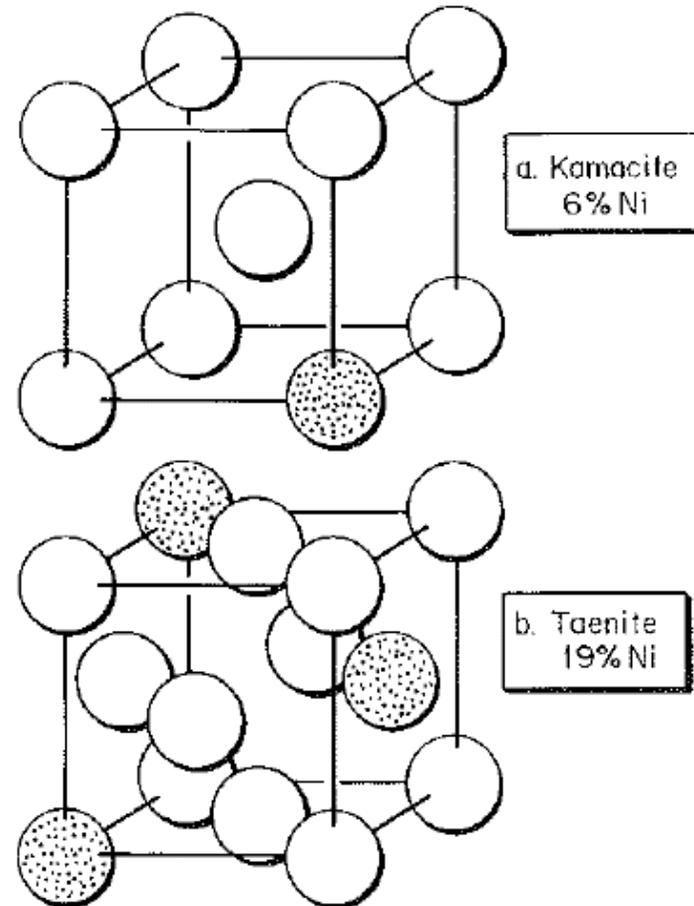


Fig Dodd 1986

- hexahédrites :

- un seul cristal de kamacite avec des inclusions de FeS et/ou de  $(\text{Fe, Ni})_3\text{P}$  et des lignes orientées (bandes de Neumann produites par des chocs)
- cristaux cubiques (hexaèdre)
- concentration en Ni entre 5,3% pds et 5,8 %pds

- octahédrites

- associations de cristaux de kamacite autour de un (ou quelques) cristaux de taenite = bandes de kamacite de différentes épaisseurs (ff- $<0,2$  mm, f  $0,2 << 0,5$ , m  $0,5 << 1,3$ , c  $1,3 << 3,3$ , cc  $>3,3$ )
- l'arrangement des cristaux de kamacite forme des octaèdres (figures de Widmanstätten)
- concentration en Ni entre 5,8 % pds et 12 % pds

- ataxites

- constituées de mélange très fins de taenite et de kamacite (plessite)
- pas de structure visible à l'œil (ataxite)
- concentration en Ni entre  $> 12$  % pds



hexahedrite



Youndegin IAB  
(coarse octahedrite)



Gibeon IVA  
(fine octahedrite)

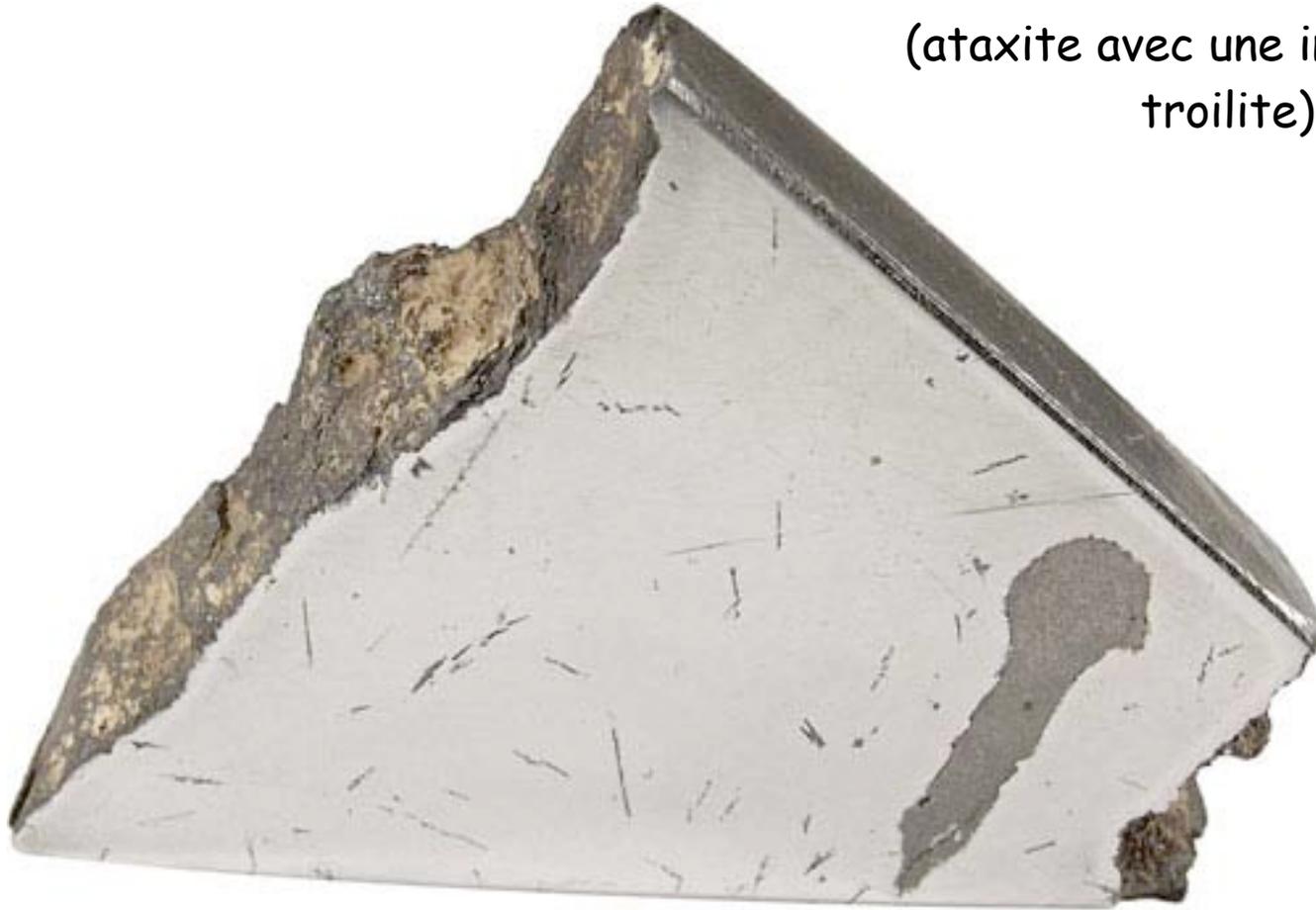
Toluca IAB

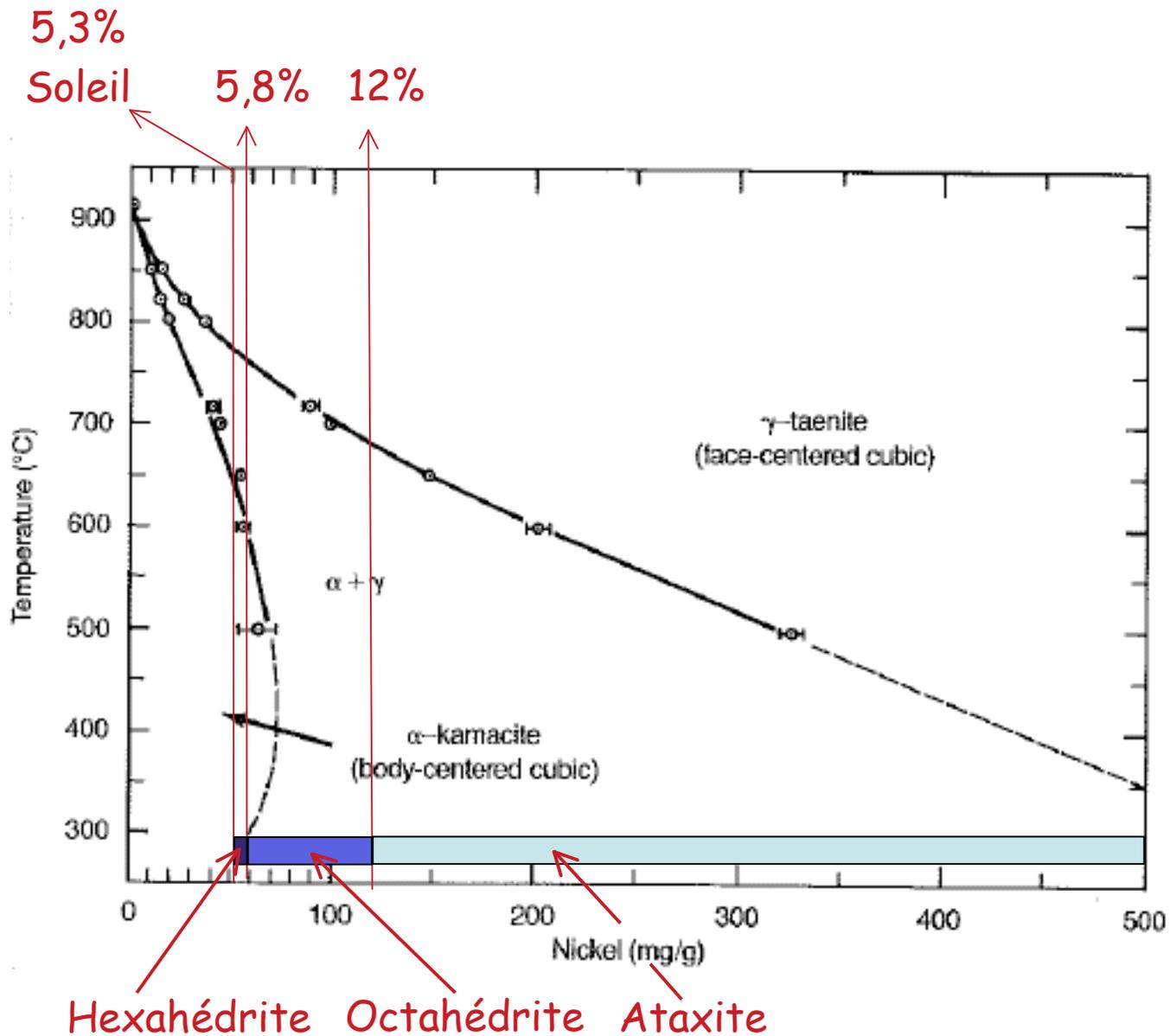


Muonionalusta (IVA)



Corowa IIF  
(ataxite avec une inclusion de  
troilite)





$Fe/Ni_{\text{Soleil}} = 15,78$  soit 5,96 % pds Ni dans FeNi

$Fe/Ni_{\text{Chondrites}} = 17,30$  soit 5,46 % pds Ni dans FeNi

Lors du refroidissement d'une taenite  
de haute température, vers 500-700°C  
il y a exsolution de kamacite et la croissance  
des cristaux de kamacite se fait sur le (ou les)  
cristal de taenite ce qui forme les octaèdres

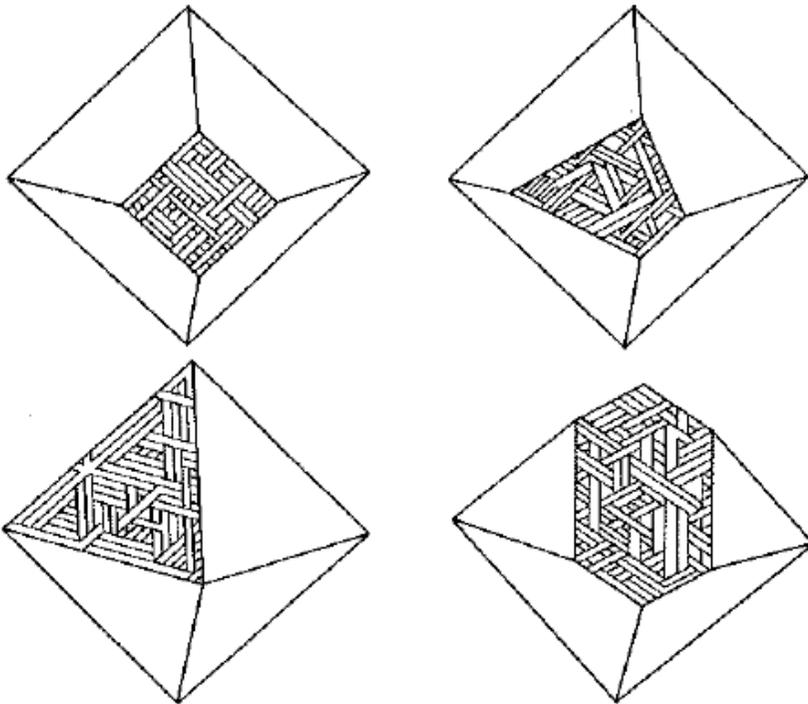


Fig Mason 1962

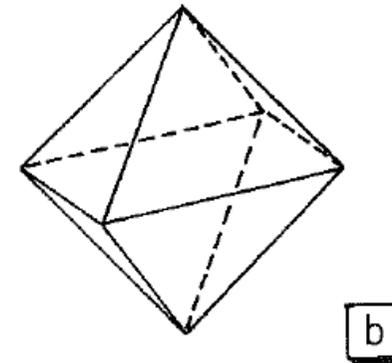
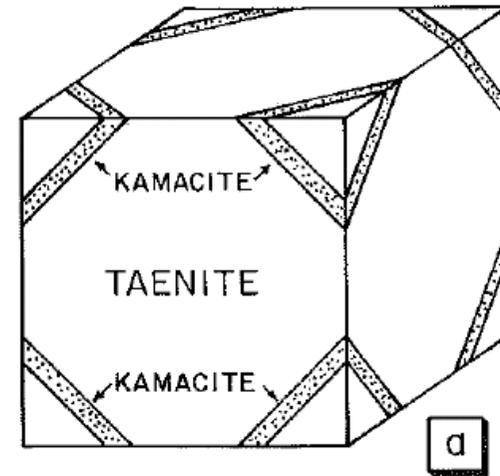


Fig Dodd 1986

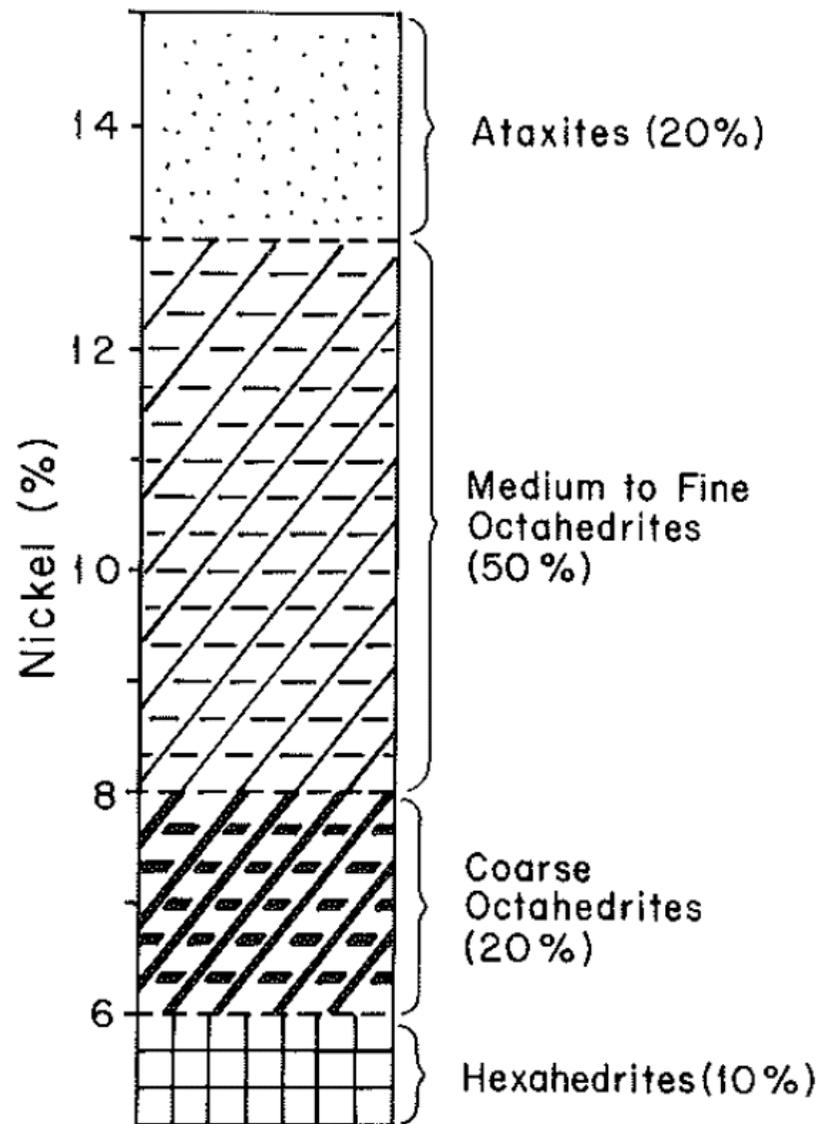
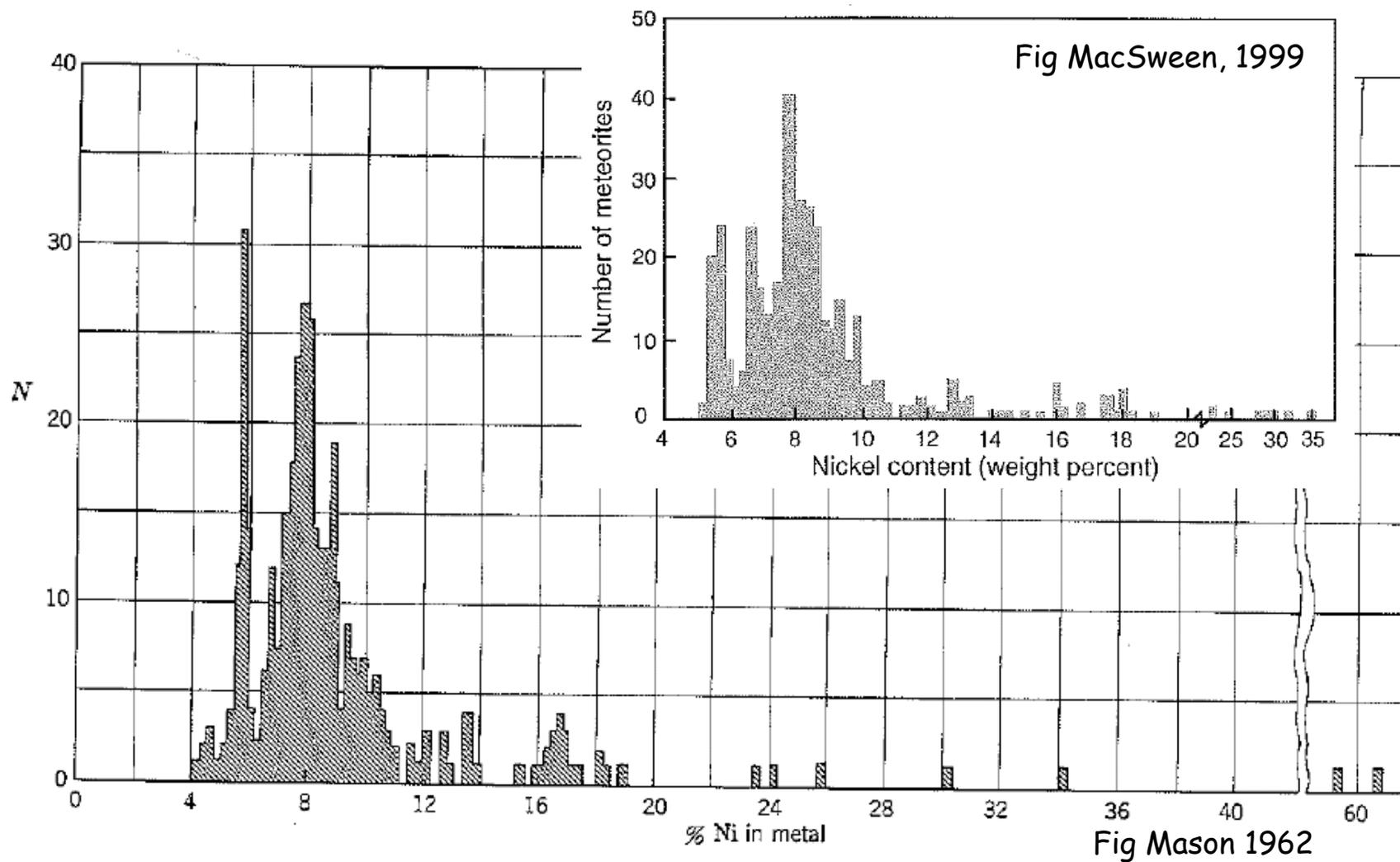
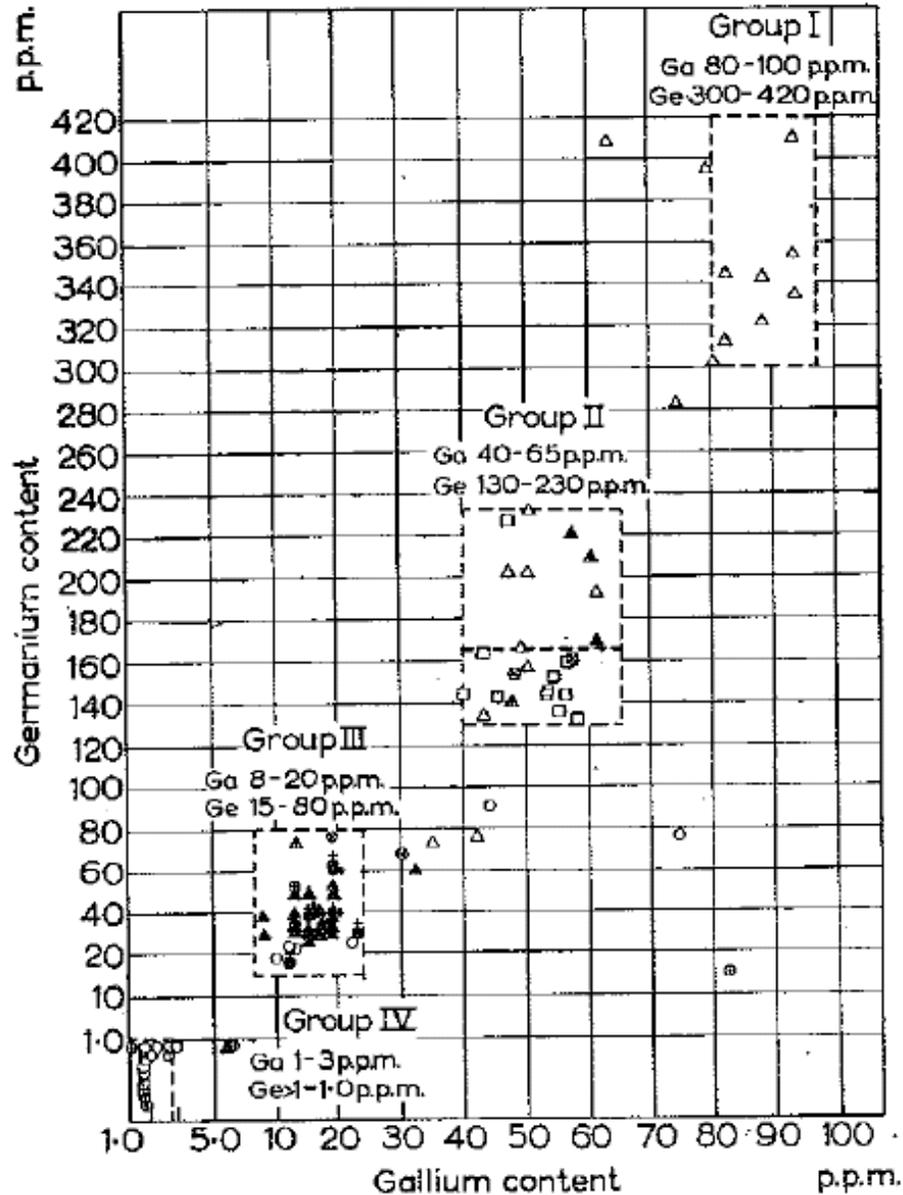


Fig Dodd 1986

Il existe une systématique dans la variation des concentrations en Ni



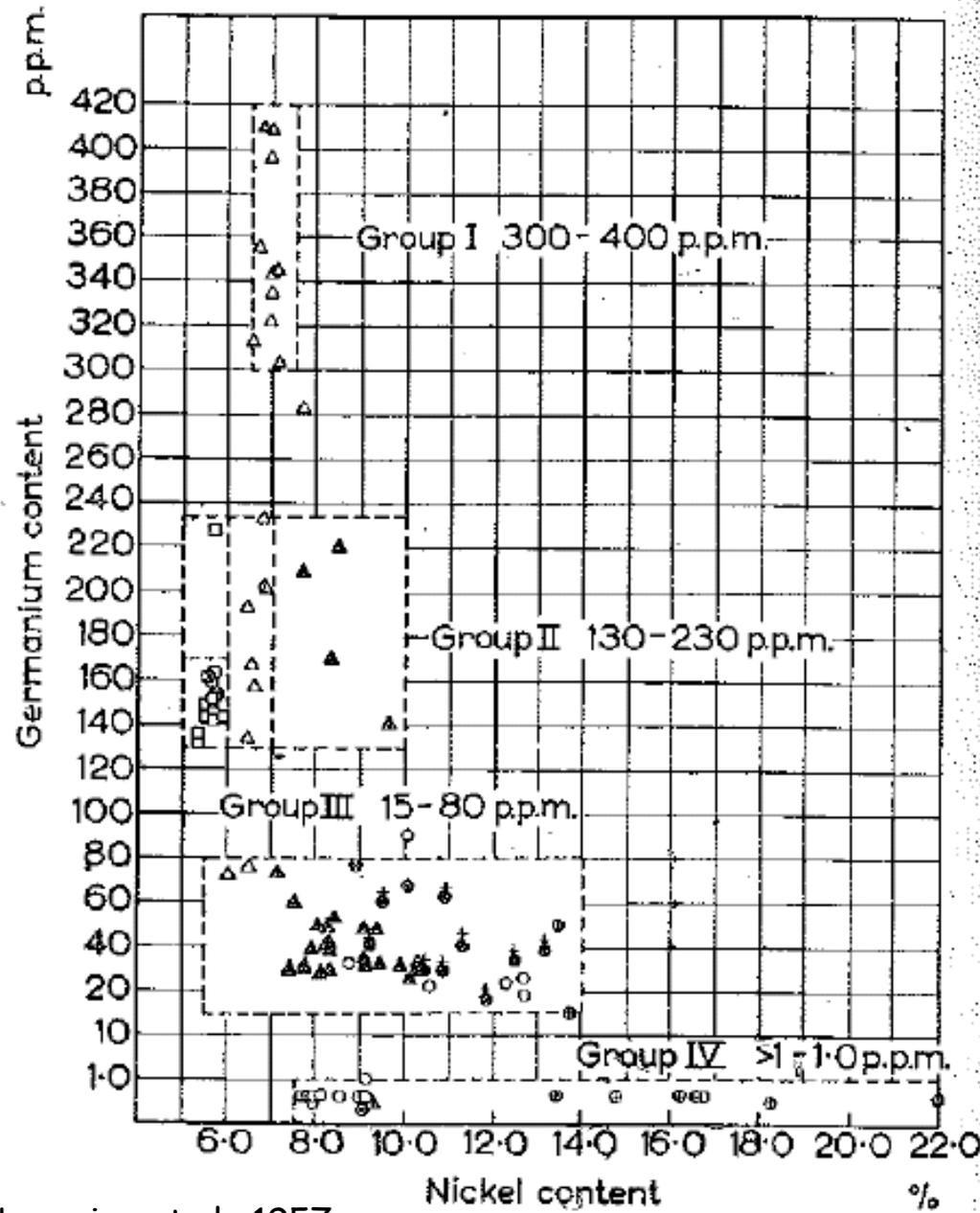
La classification chimique repose sur les éléments en traces (Ga, Ge, Ir, ...)



Lovering et al. (1957) ont découvert que les concentrations en Ga et Ge montraient des variations “quantiques”.

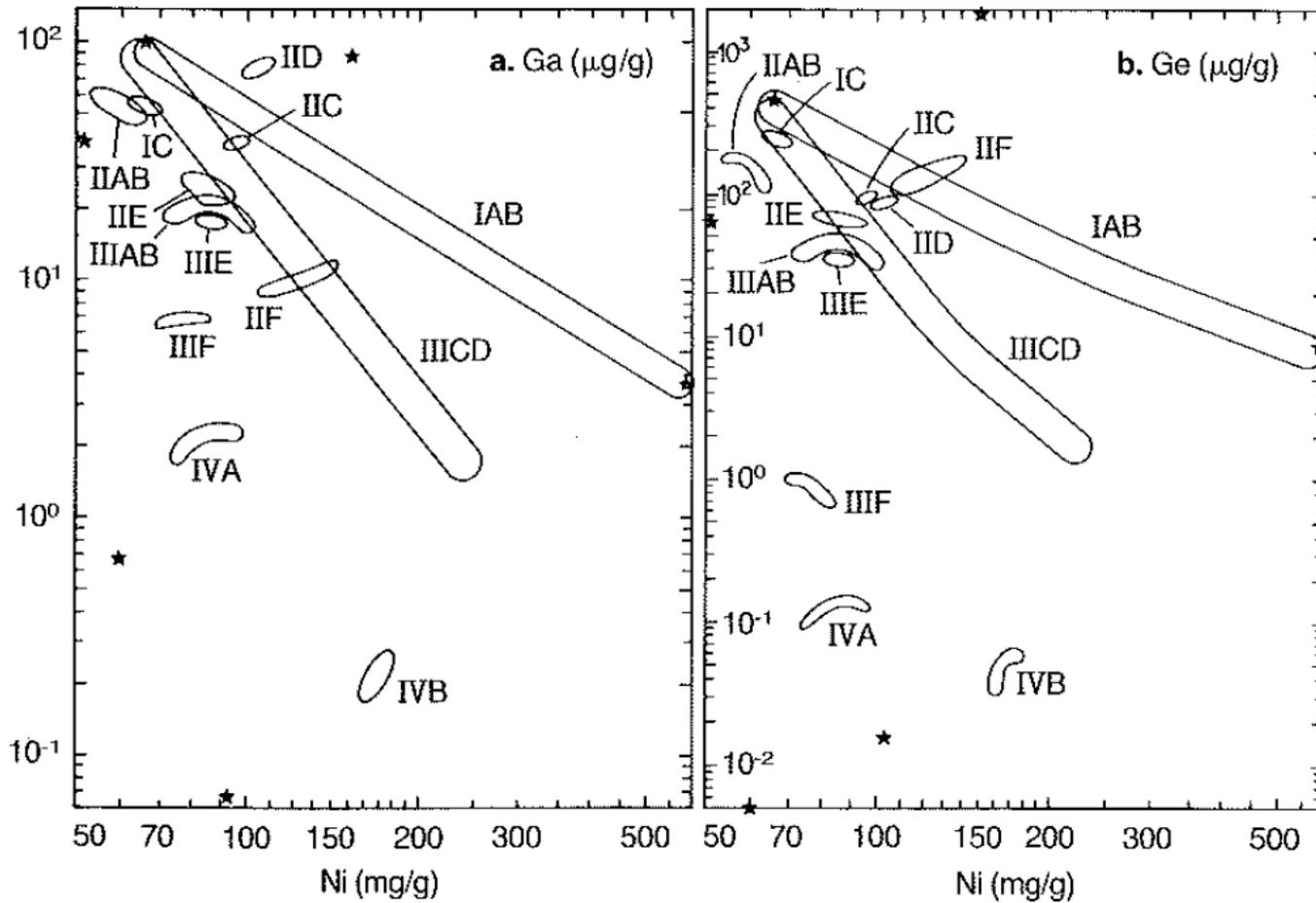
Ils ont défini quatre groupes : I à IV

	Ga (p.p.m.)	Ge (p.p.m.)
Group I	80-100	300-420
Group II	40-65	130-320
Group III	8-24	15-80
Group IV	1-3	<1-1



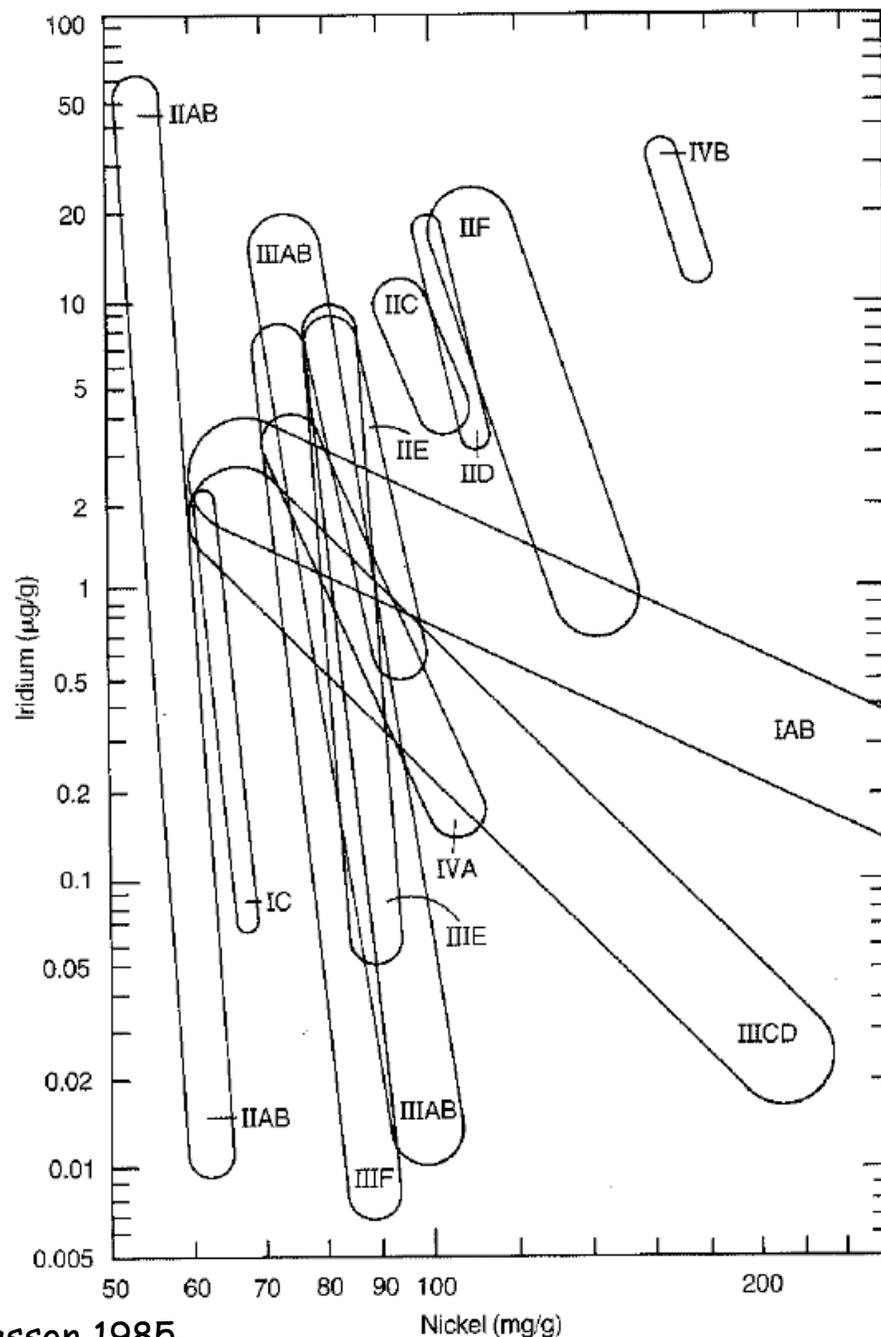
L'intérêt des groupes de Ge-Ga est que si les concentrations de Ge et Ga sont corrélées entre elles, elles ne le sont pas du tout avec les concentrations en Ni

John Wasson (UCLA) a analysé TOUTES les météorites de fer (depuis 1967) et a amélioré la classification de Lovering en 4 groupes en rajoutant des lettres (deux groupes séparés = 1 lettre, par ex IVA et IVB continuum dans un groupe = 2 lettres, par ex IIAB)



Wasson 1985

13 groupes + 13% des météorites de fer en dehors de ces groupes (50 groupes ?)



Wasson 1985

Les concentrations en Ir varient jusqu'à un facteur 5000 à l'intérieur d'un groupe.  
(on voit aussi les groupes IAB et IIIICD qui sont différents)

Le métal des pallasites : un groupe principal + 2 autres groupes mineurs

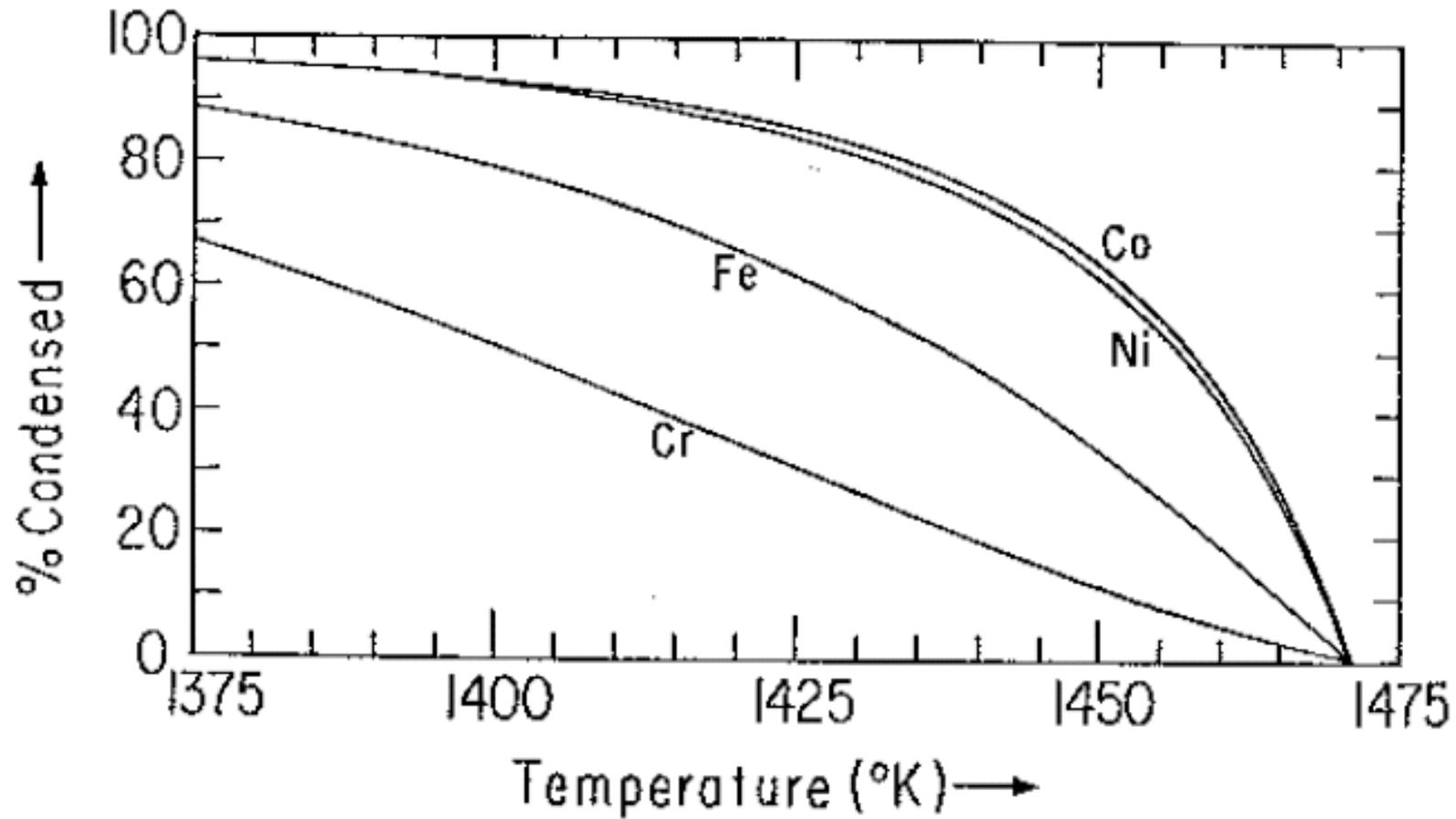
*Il y a bien sûr des relations entre types pétrographiques et groupes chimiques, mais simplement à travers les concentrations en Ni*

Quelle est la signification de tous ces groupes ?



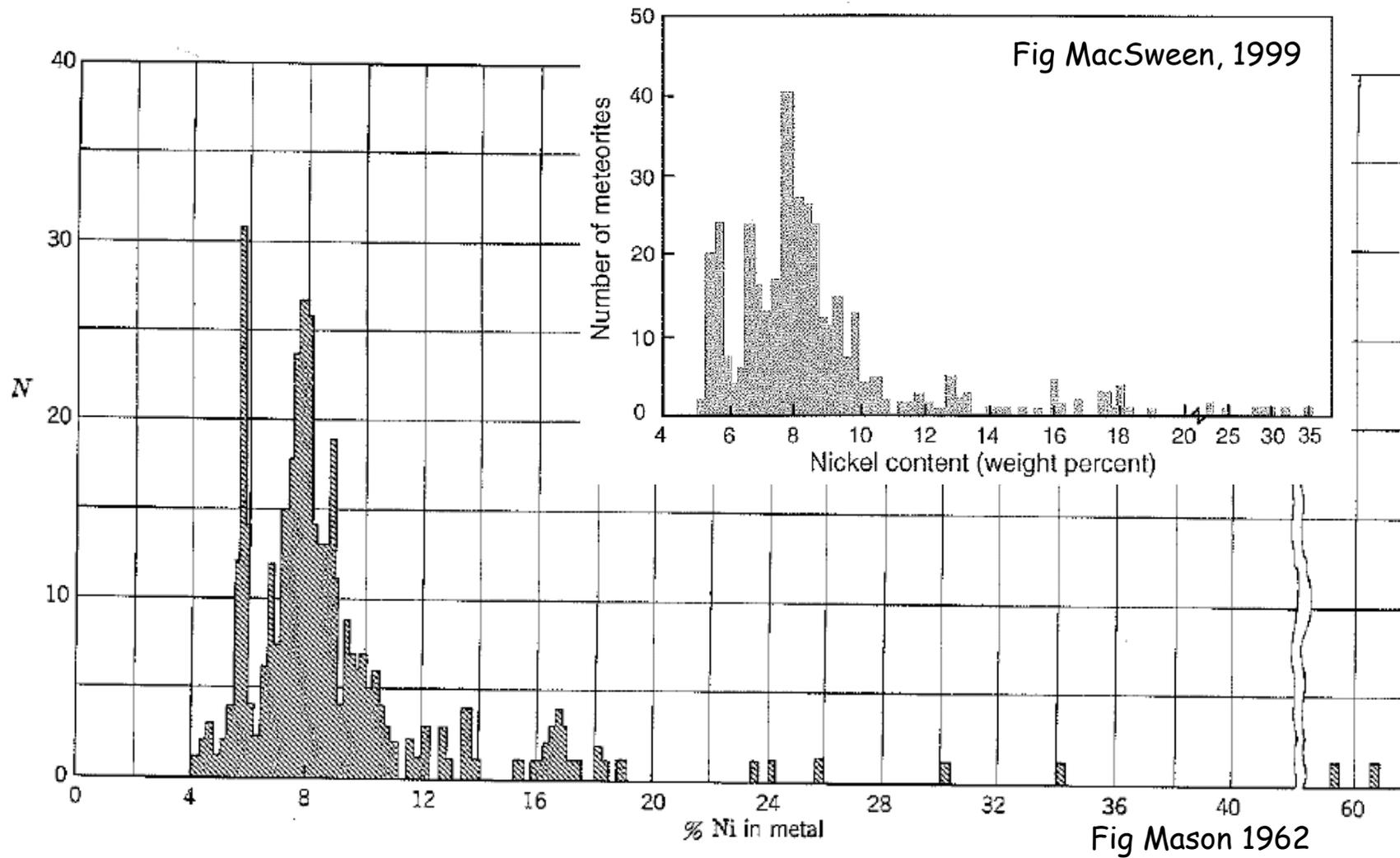
- Les météorites de fer sont elles bien le résultat d'une différenciation métal-silicate ?

Ce n'est pas une question stupide car on sait depuis longtemps que le métal peut se condenser directement à partir du gaz de la nébuleuse (idem enveloppes d'étoiles)

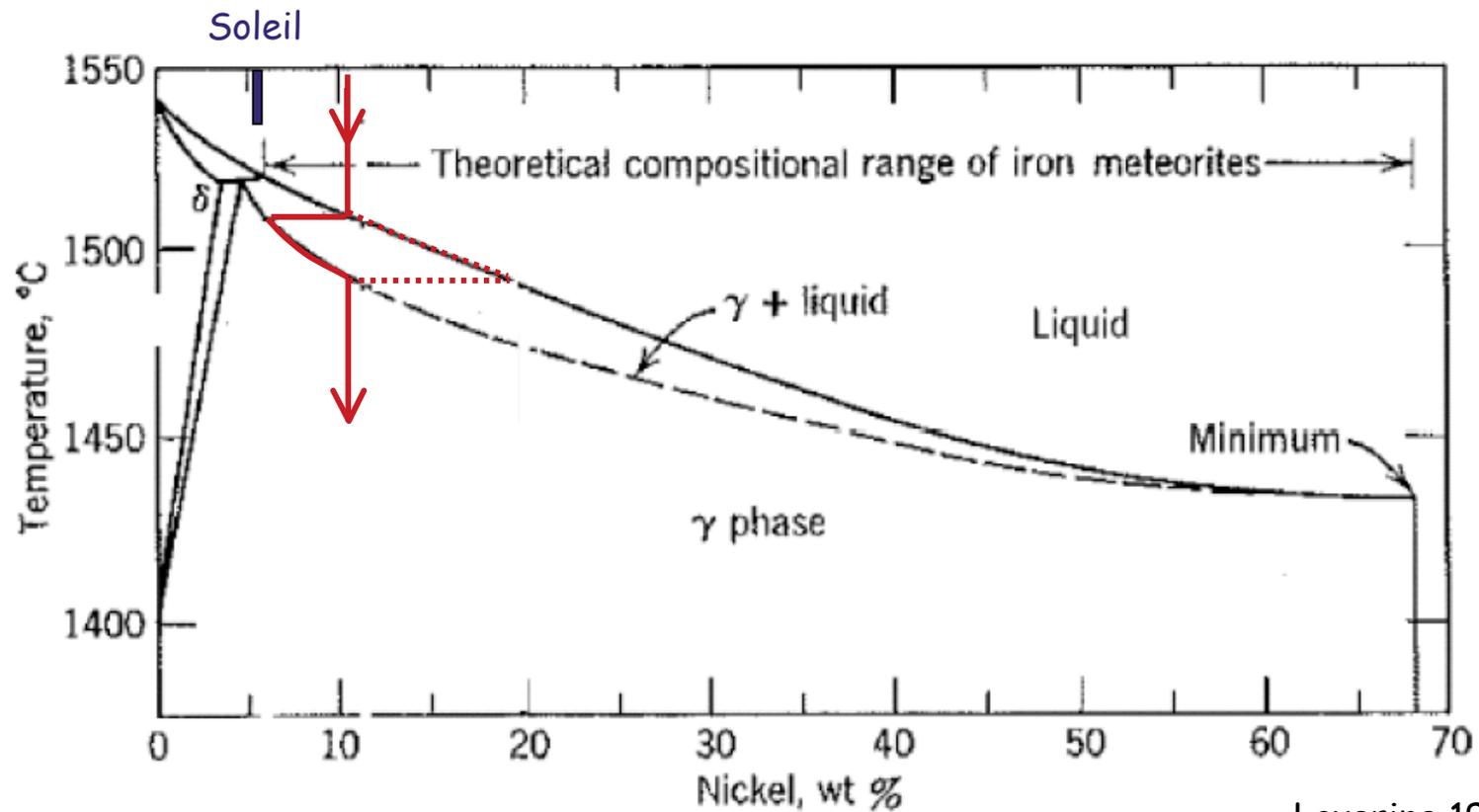


Grossman & Olsen, 1974

La variation des concentrations en Ni ne peut se comprendre qu'à travers la cristallisation fractionnée d'un liquide métallique



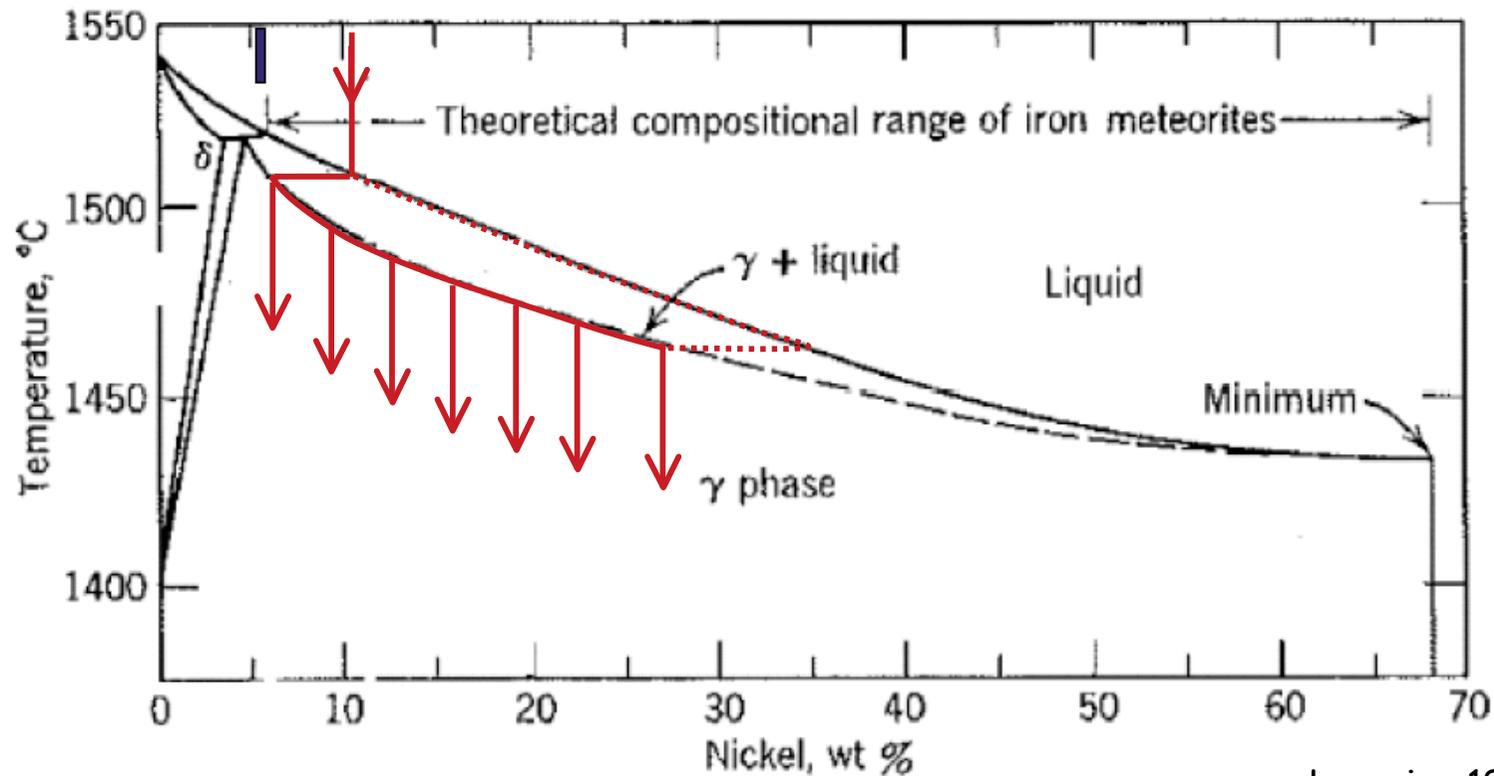
Un parcours de cristallisation à l'équilibre n'explique pas les proportions observées des météorites de Fer avec différentes concentrations en Ni, et n'explique pas l'existence de fortes concentrations en Ni (max=62%pds)



Lovering 1957

Un parcours de cristallisation fractionnée permet en théorie  
d'aller jusqu'à l'eutectique :

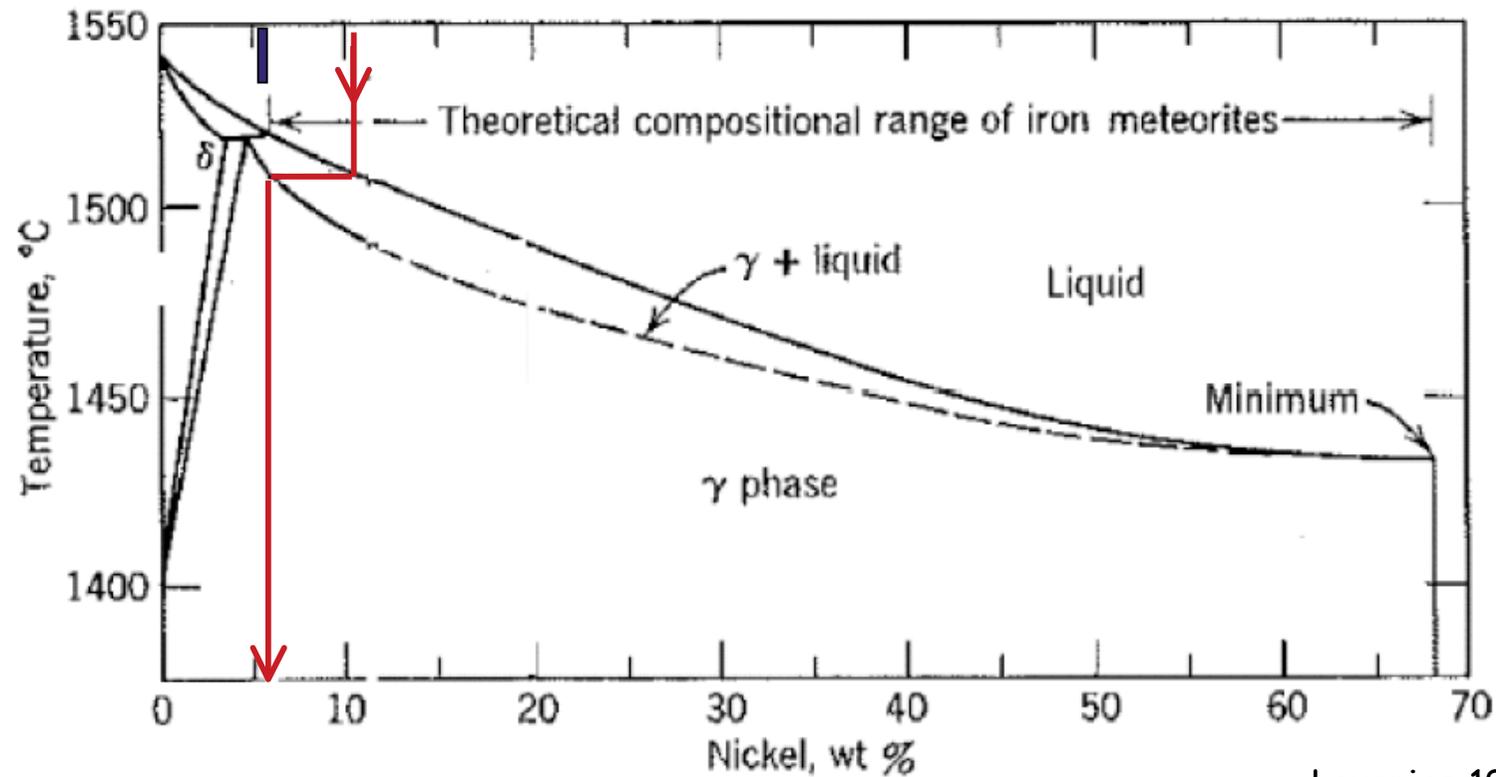
- 2 prédictions :
- wt% Ni minimum des cristaux dépend du wt% Ni du liquide
  - proportion des cristaux avec différents Ni dépend de la loupe



Lovering 1957

Une [Ni] minimum des cristaux de 5,3% implique une [Ni] du liquide de  $\approx 10-11\%$ .

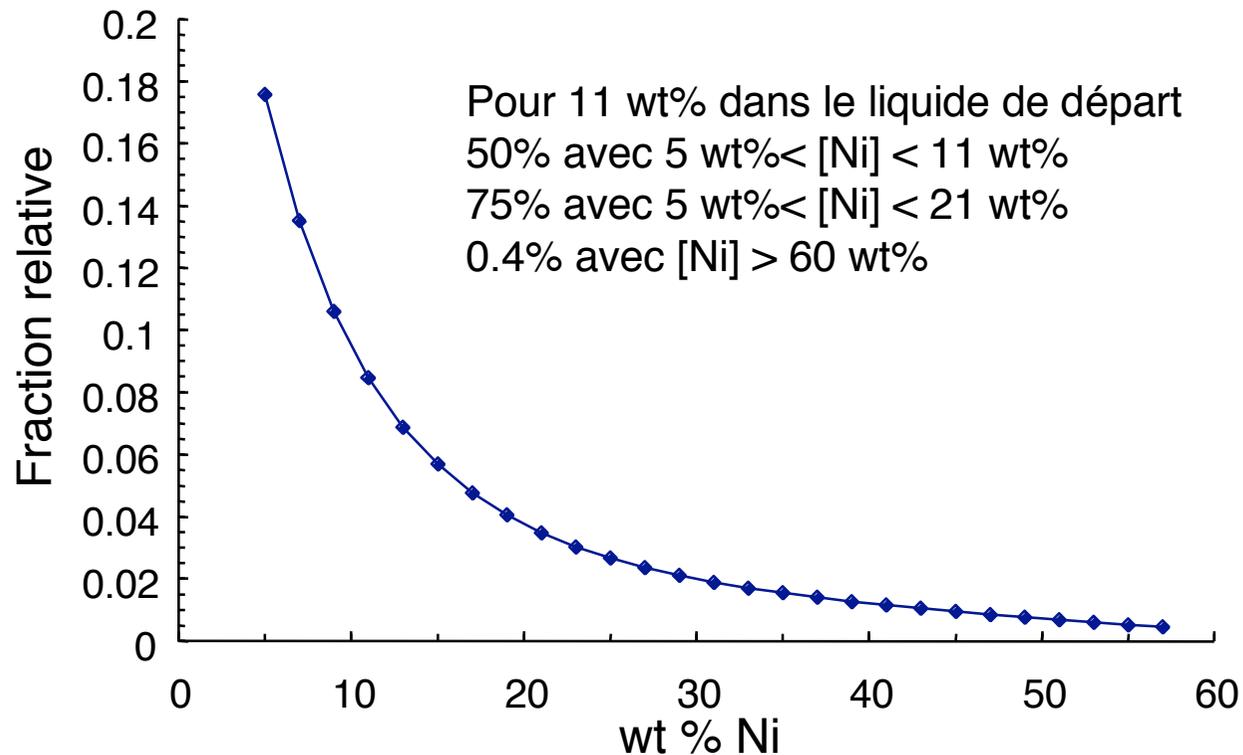
Est ce vrai ? (5,3 est aussi la valeur solaire, coïncidence !)



Lovering 1957

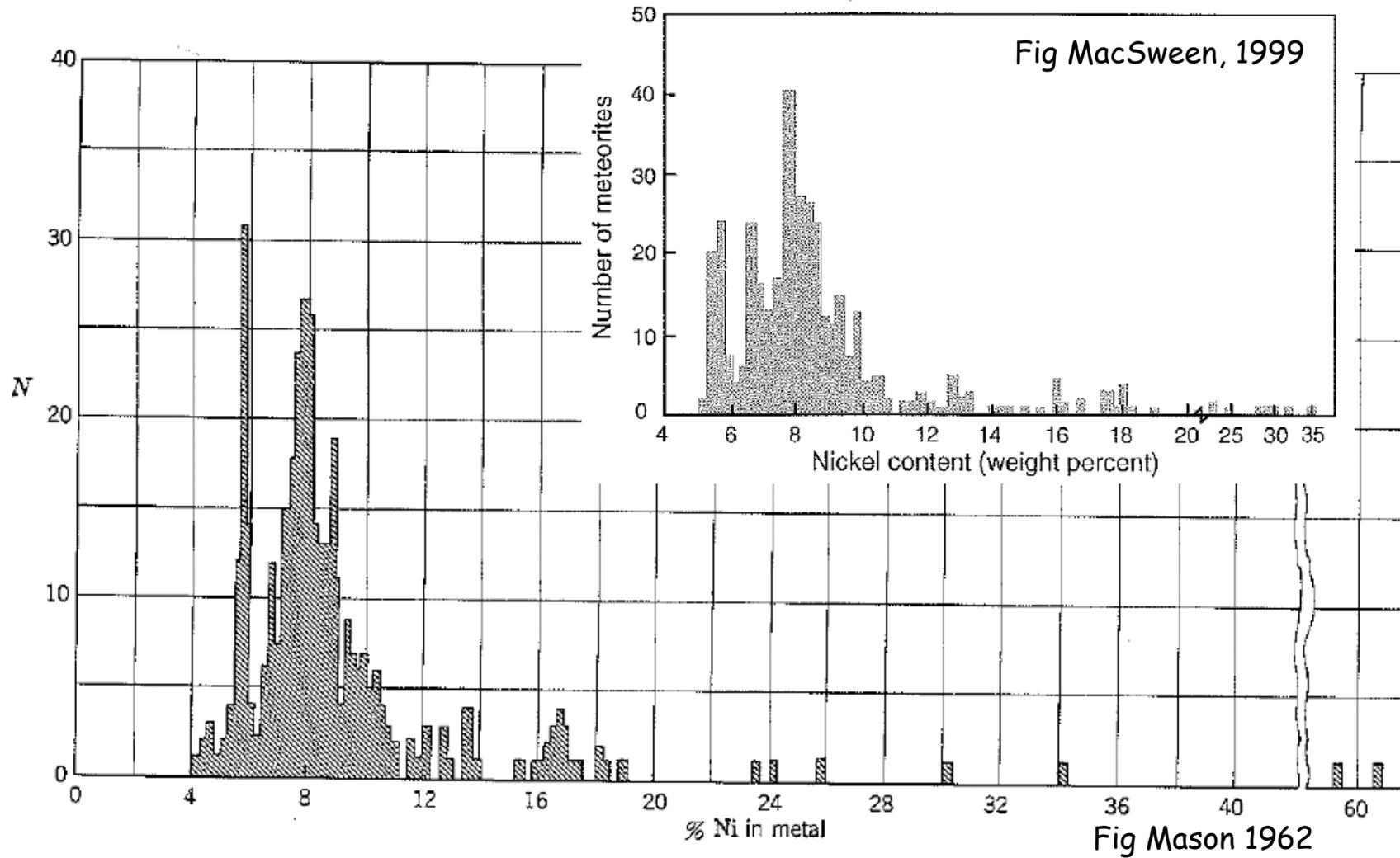
On peut calculer dans un modèle simple (on refroidit de 1 degré par 1 degré et à chaque fois on enlève la quantité de cristal donnée par le diagramme de phase) les proportions des différents cristaux produits

$$[\text{Ni}]_{i-1}^{\text{liq}} = (1-x) \times [\text{Ni}]_i^{\text{liq}} + x \times \left( \frac{[\text{Ni}]_i^{\text{sol}} + [\text{Ni}]_{i-1}^{\text{sol}}}{2} \right)$$



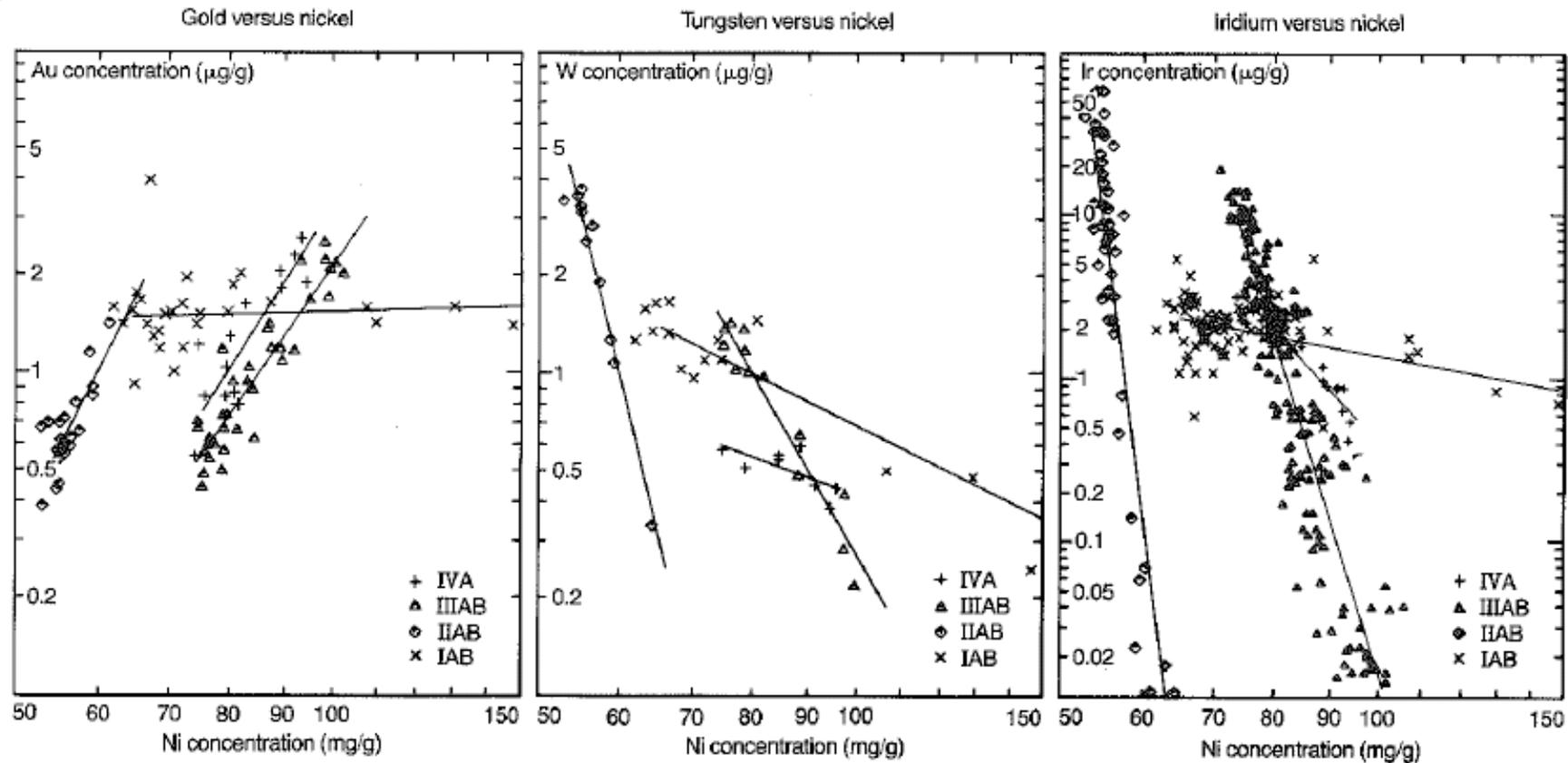
50% avec  $5 \text{ wt}\% < [\text{Ni}] < 11 \text{ wt}\%$   
75% avec  $5 \text{ wt}\% < [\text{Ni}] < 21 \text{ wt}\%$   
0.4% avec  $[\text{Ni}] > 60 \text{ wt}\%$

Ca ne "colle" pas très bien avec les observations



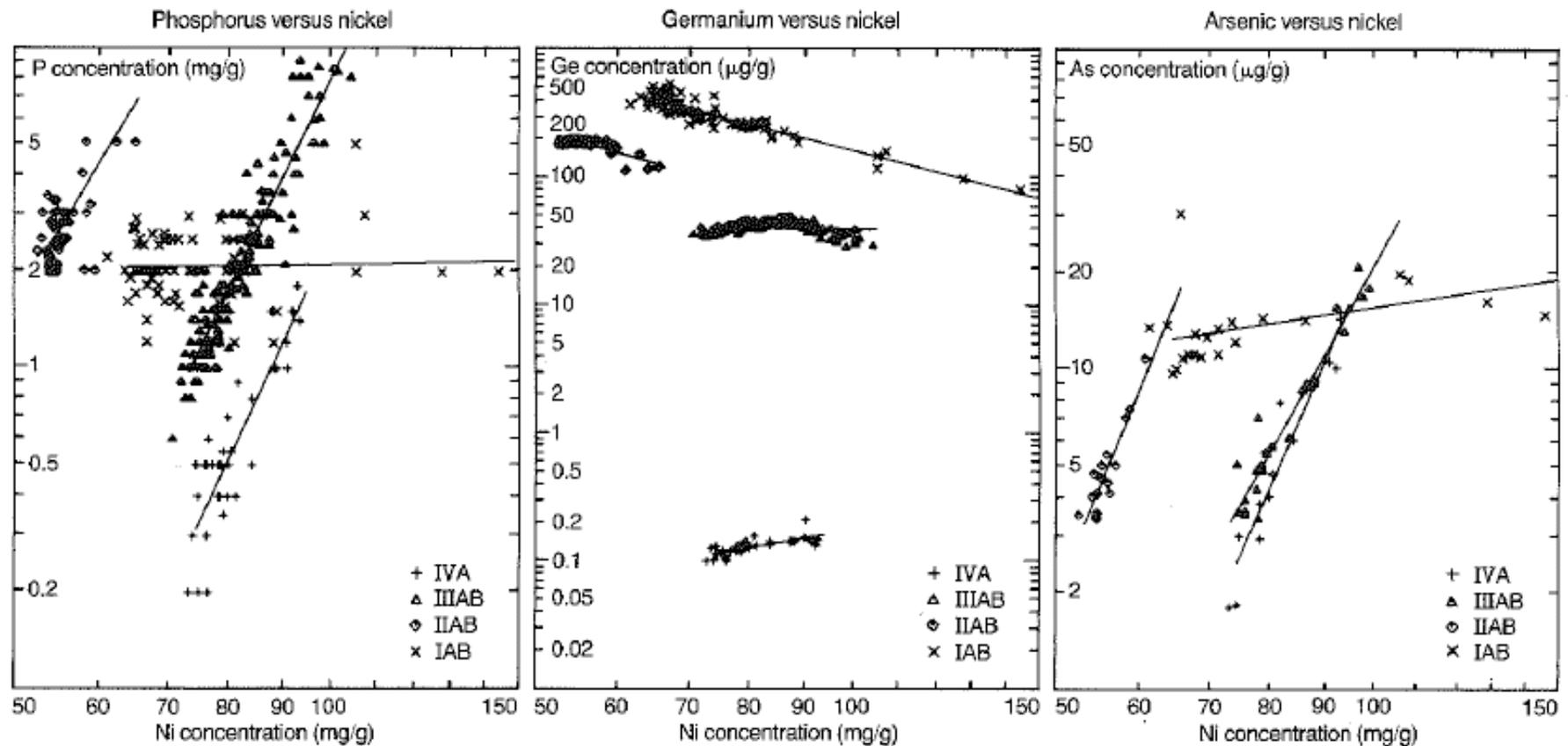
- Pic des [Ni] à 5,5 wt% : une partie des météorites de fer correspondent à une cristallisation à l'équilibre avec au départ un liquide ayant [Ni] solaire
- Les [Ni] > 20 wt% impliquent dans certains cas une cristallisation fractionnée poussée (liquides qui migrent, ... ?)
- Le fait que  $\approx 90\%$  des météorites de fer aient des [Ni] < 12 wt% peut s'expliquer soit par :
  - des [Ni] dans les liquides de départ entre 5,5 et 12 wt% et des cristallisations à l'équilibre
  - un [Ni] de départ  $\approx$  constant (entre 10 et 11 wt%) et une cristallisation fractionnée tronquée (refroidissement trop rapide)
  - *un biais d'échantillonnage : à discuter ici le soir*

- [Ga] et [Ge] varient beaucoup entre chaque groupe mais peu à l'intérieur d'un groupe, sauf pour les IAB et IIICD
- [Ir] et autres éléments en trace varient beaucoup à l'intérieur d'un groupe



- coefficient de partage :  $D^{Ni}_{cristal/liquide} = \frac{[Ni]_{cristal}}{[Ni]_{liquide}}$  entre  $\approx 0,5$  et  $0,9$
- si cristallisation fractionnée alors :  $C = C_0 \times f^{(D-1)}$
- on explique les corrélations linéaires (log-log) par une cristallisation fractionnée avec les D déterminés expérimentalement (e. g. 4 pour Ir et 0,1 pour P)

IAB et IIIICD : non magmatiques (mélanges lors d'impacts ?) et tous les autres (ainsi que les pallasites) magmatiques



→  
sens de cristallisation

Wasson 1985

Ce n'est pas la cristallisation fractionnée qui peut expliquer les différences d'un facteur 1000 de [Ge] et [Ga] entre différents groupes magmatiques.  
D'où viennent les différences de [Ge] et [Ga] ?

- différentes conditions d'oxydo-réduction et partages lors de l'équilibre entre liquide silicaté et liquide métallique  
([Ge]  $\approx$  40 ppm et [Ga]  $\approx$  15 ppm dans CI)  
Comment expliquer les concentrations  $\ll$  chondrites ?

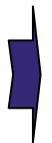
- une origine du métal par condensation (fractionnement à des températures de condensation variables):

$T_{\text{cond}}$  de Fe et Ni entre 1300 et 1350 K

$T_{\text{cond}}$  de Ge = 883 K

$T_{\text{cond}}$  de Ga = 968 K

si métal condensé : [Ge] et [Ga] très faibles (groupe IV ?)



En tous cas les différents groupes Ge-Ga correspondent à différentes compositions initiales, différents corps parents ?

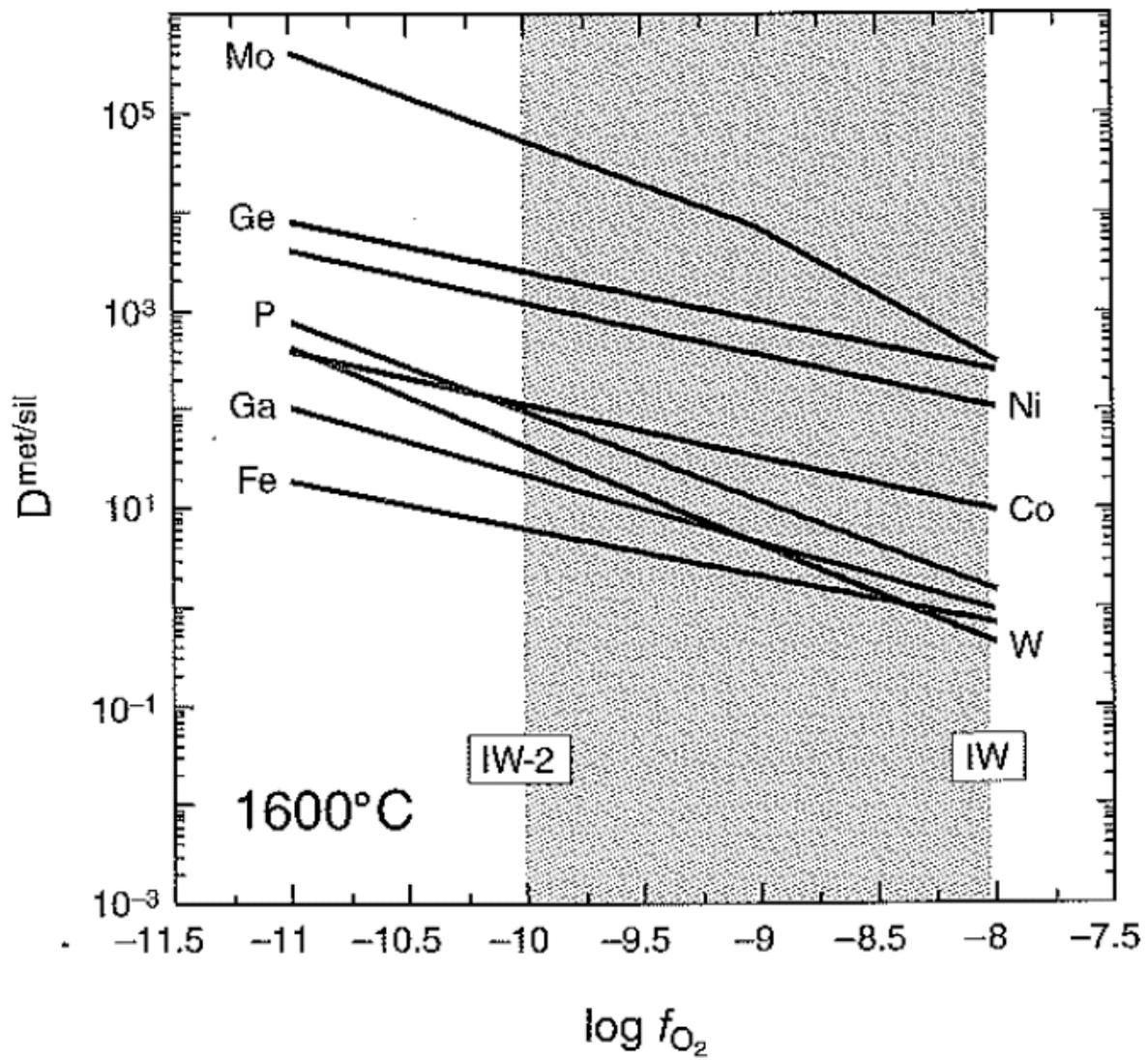


Fig Walter et al., 2000



Une autre implication des corrélations entre [Ni] et [Ir] (ou autres) est que toutes les variations de [Ni] sont dues à de la cristallisation fractionnée.

Mais alors il faut des [Ni] du liquide départ de 10 à 11 wt% pour expliquer les [Ni] de 5,3 wt%.

Comment obtient t'on des liquides métalliques avec des [Ni] deux fois solaires ?

Faire varier la pression d'équilibration entre le liquide silicaté et le liquide métallique lors de la différenciation

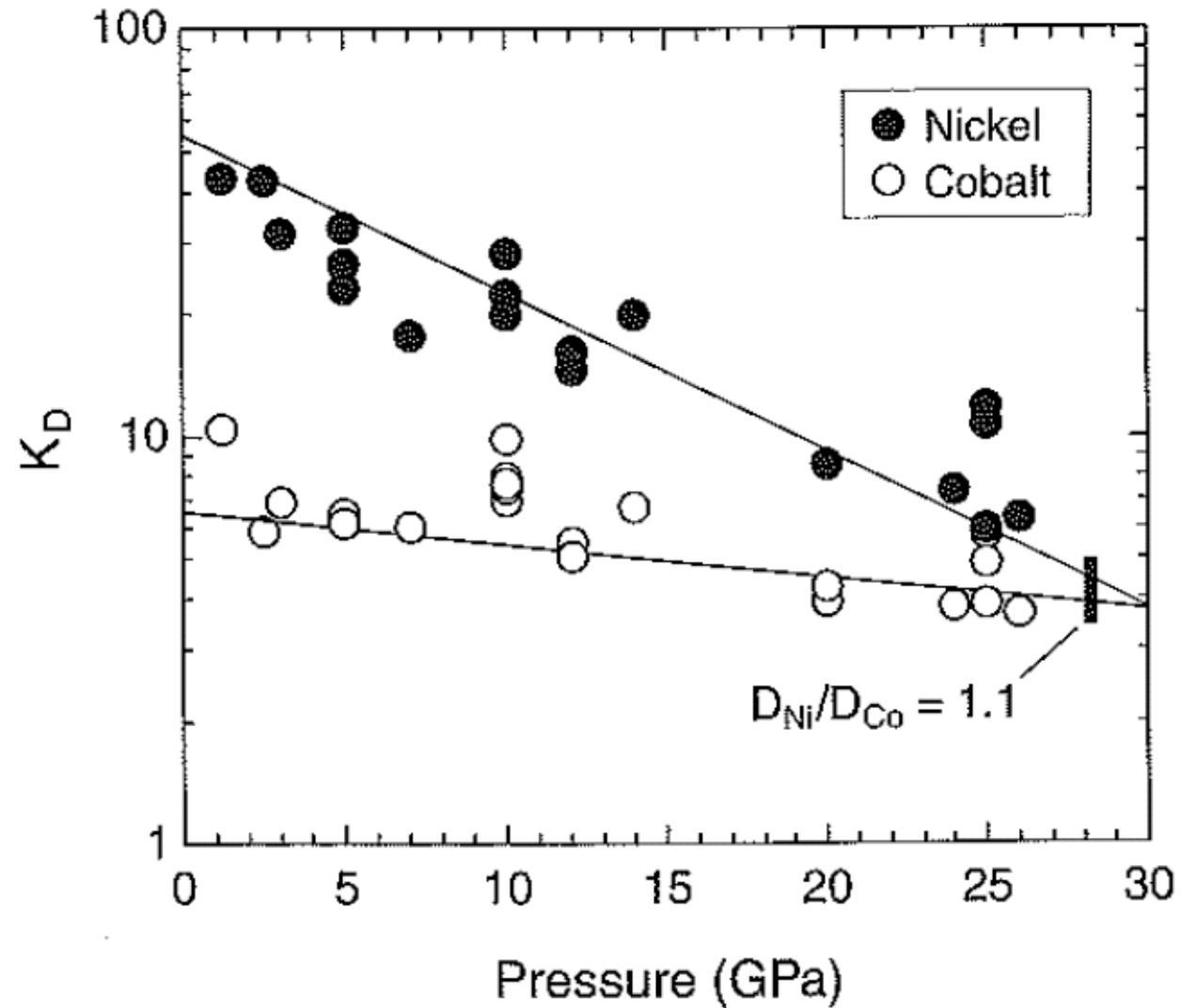
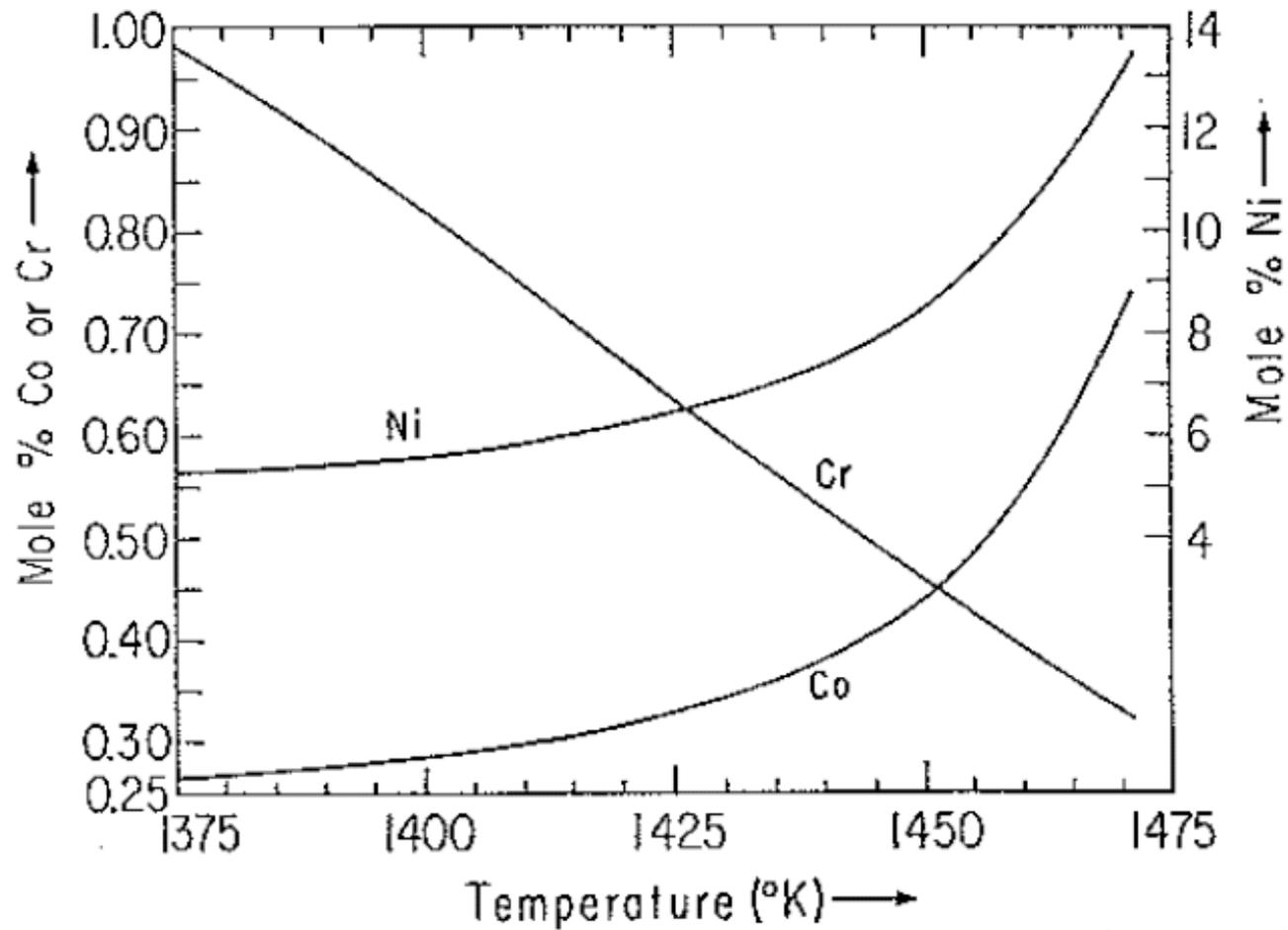


Fig Walter et al., 2000 (données Li & Agee, 1996)

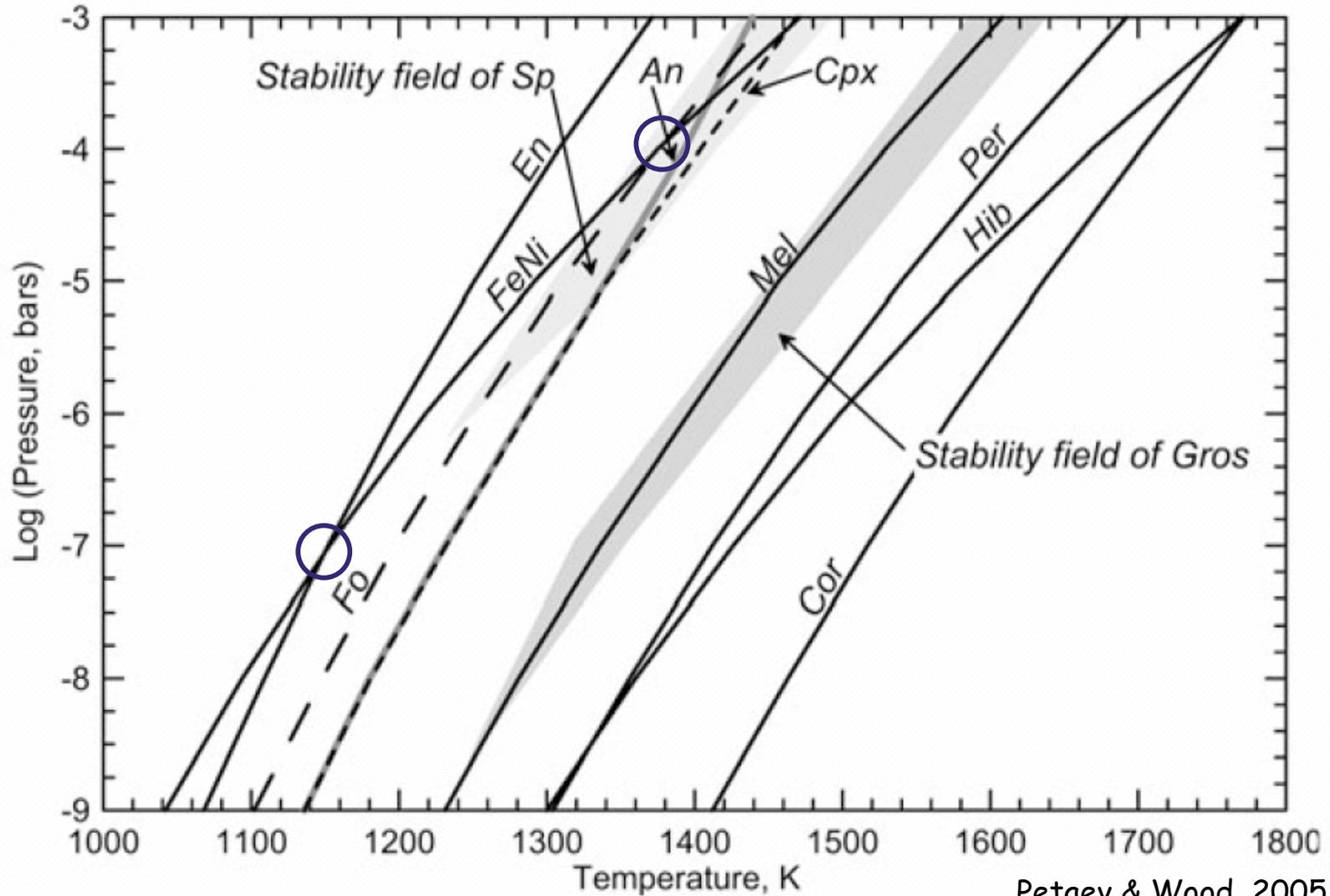
Les calculs de condensation prédisent que la concentration en Ni du FeNi condensé va dépendre de la température



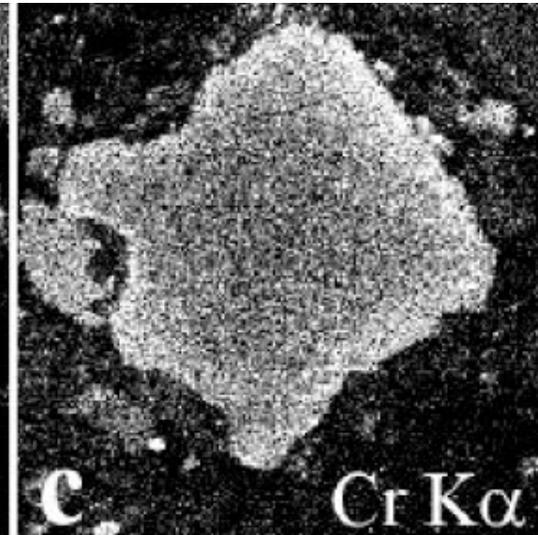
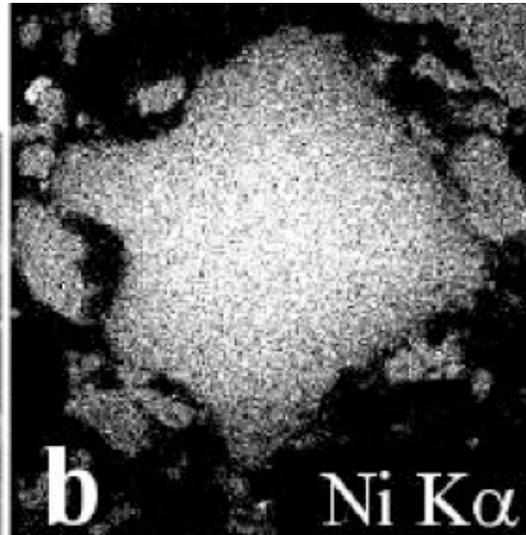
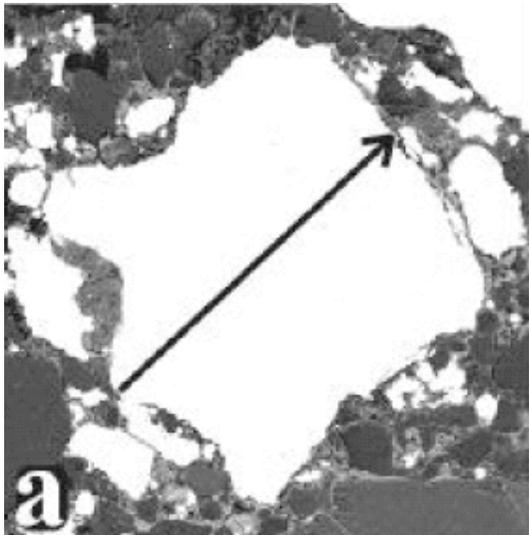
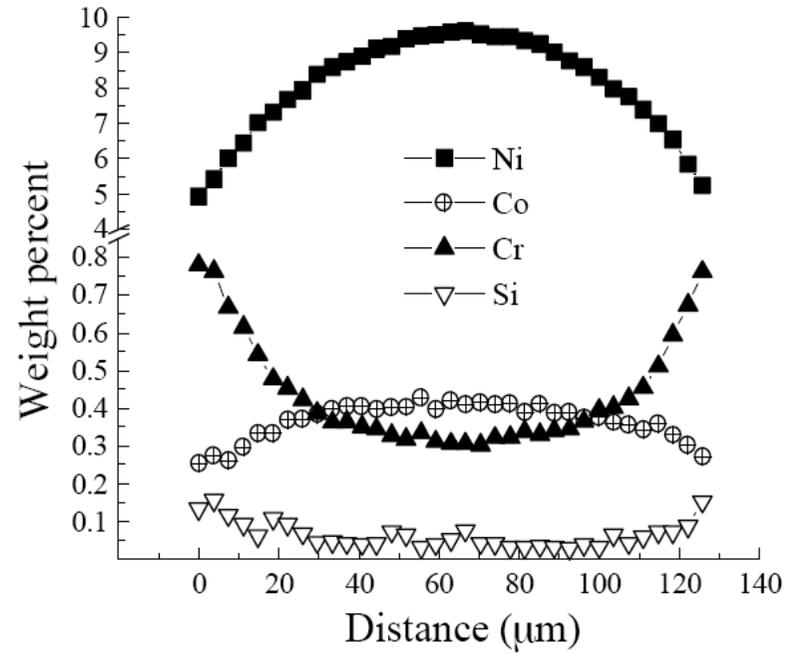
Grossman & Olsen, 1974

Existence de deux cross-over dans les calculs de condensation à l'équilibre  
(pour un gaz de composition solaire) :

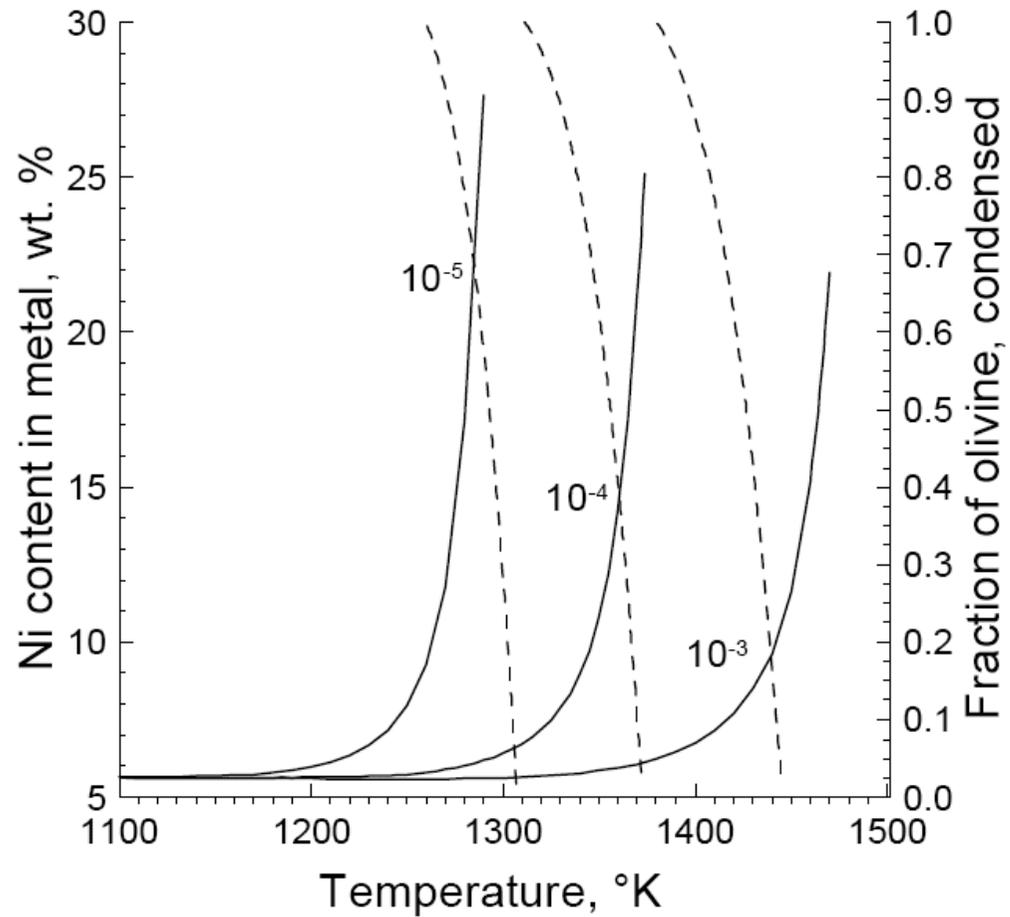
- FeNi-Forstérite pour  $P = 1 \times 10^{-4}$  bar &  $T = 1372^\circ\text{K}$
- FeNi-Enstatite pour  $P = 4,8 \times 10^{-8}$  bar &  $T = 1150^\circ\text{K}$



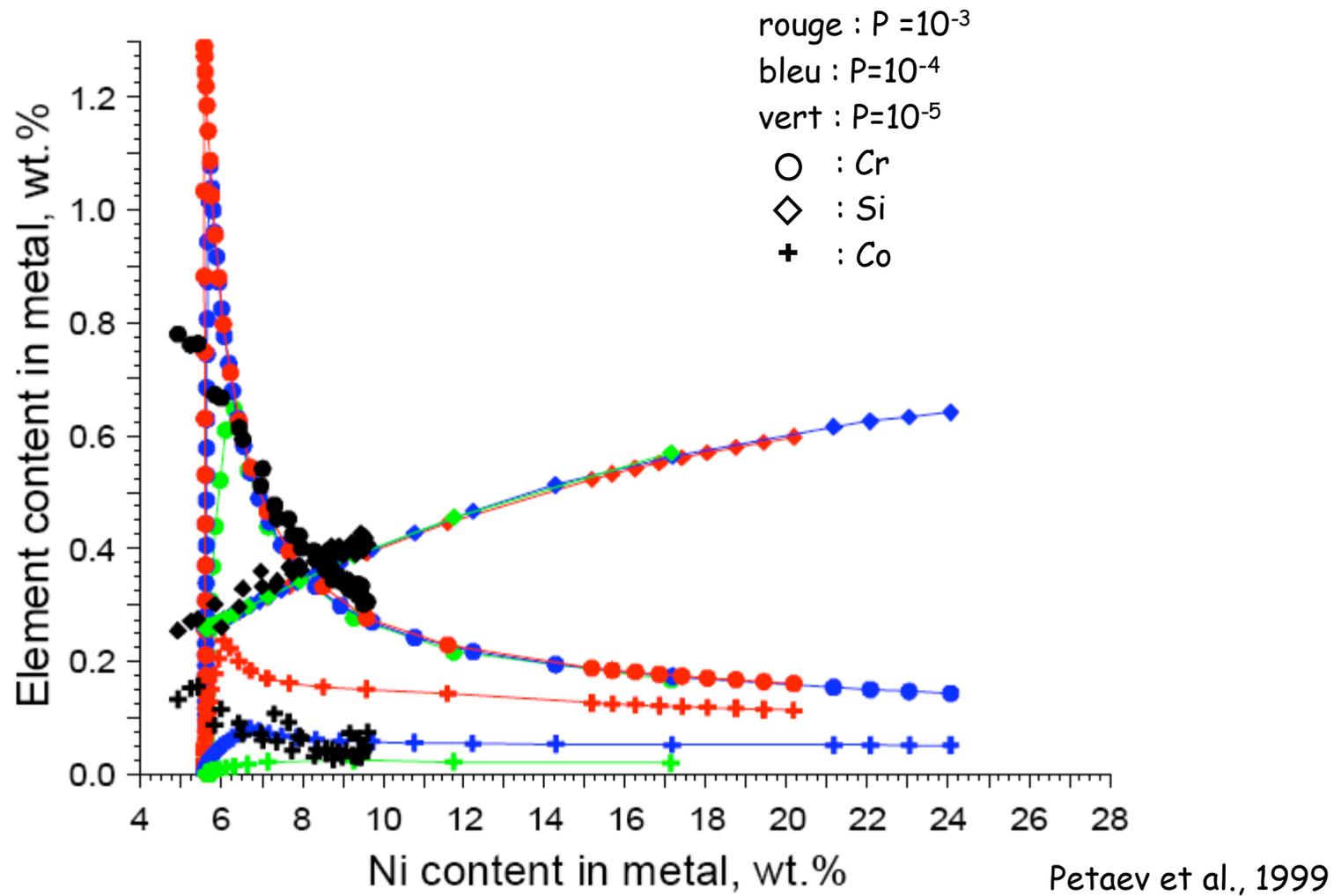
Les zonation observées en Ni, Co, Cr, Si dans certains des grains de métal des chondrites CH indiquent une origine par condensation.



Calcul thermodynamique à l'équilibre pour un gaz de composition solaire de la concentration en Ni du métal condensé (courbe pleine) en fonction de la température et de la pression totale (à  $P=10^{-5}$  l'olivine se condense avant le métal et c'est le contraire pour  $P<10^{-4}$ )

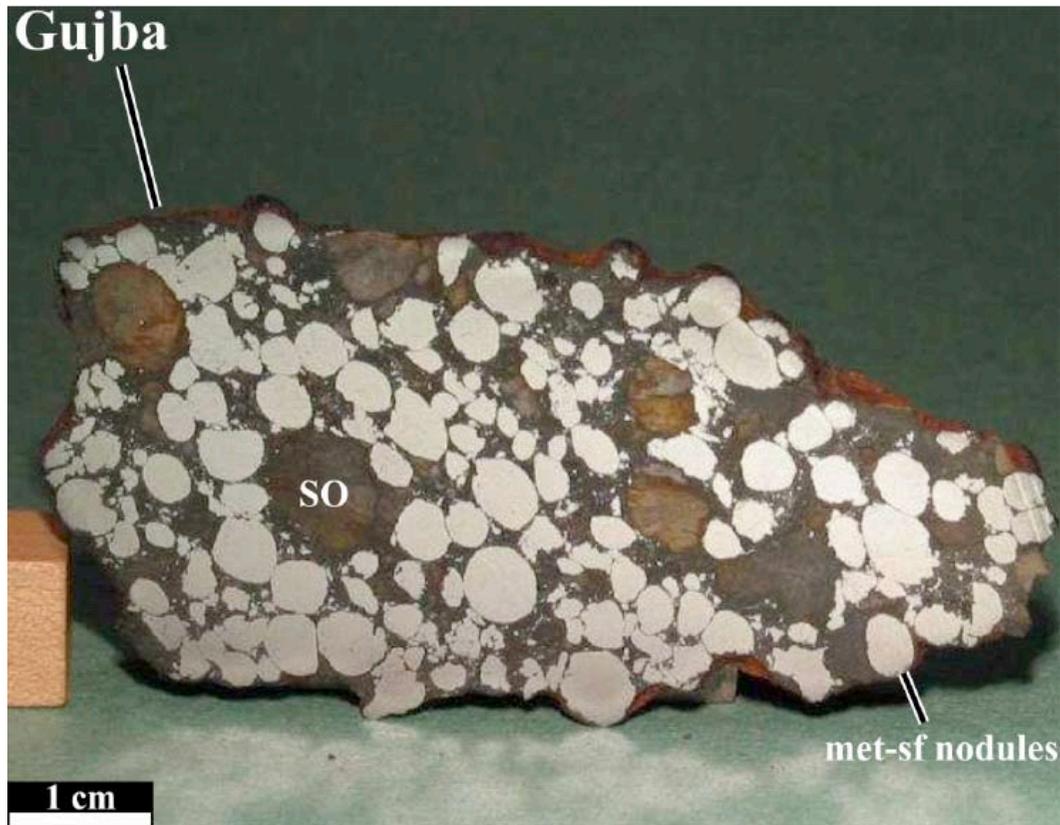


Petaev et al., 1999



La condensation à l'équilibre reproduit très bien les profils mesurés dans les grains (sauf en bordure)

Donc à priori on peut imaginer la formation dans le disque de roches  
du type Forstérite + FeNi (+ le reste)



Un analogue pourrait  
être par exemple les  
chondrites CB (faites elles  
probablement par impact  
plusieurs Ma après les CAIs)

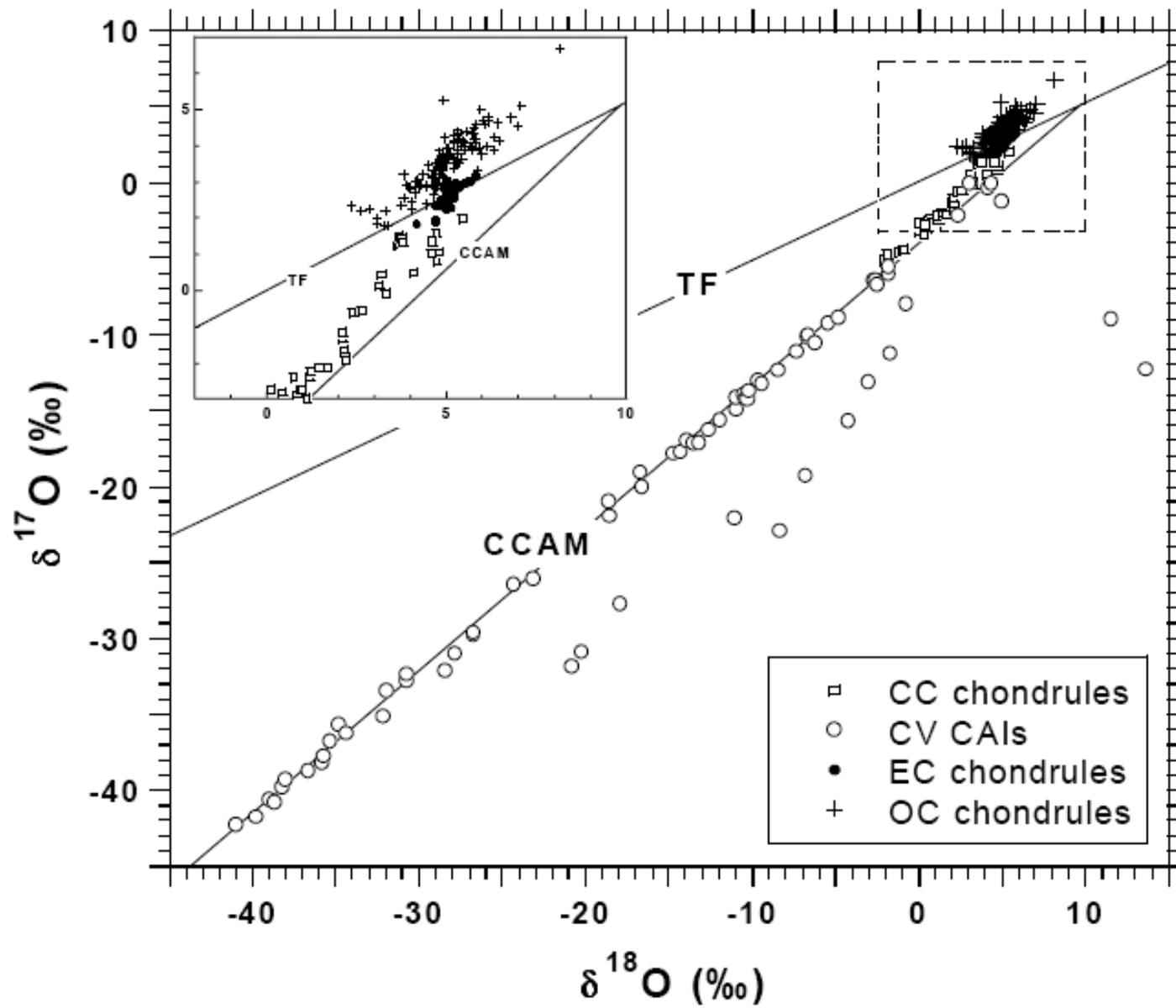
Photo A. N. Krot



• Que peut on dire sur les corps parents des météorites de fer ?

- nombre
- taille ou histoire thermique
- fragmentation





McKeegan & Leshin (2001)

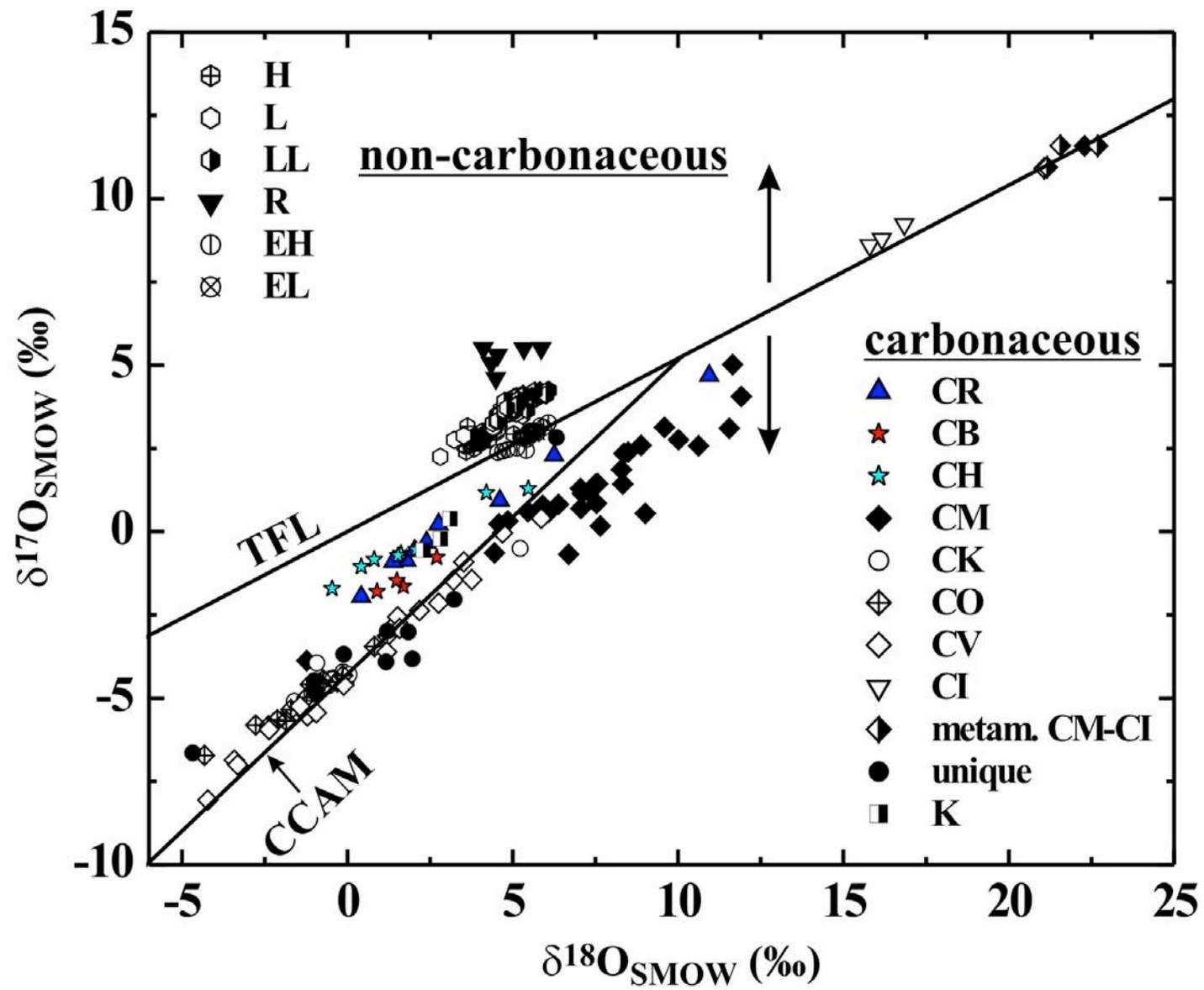
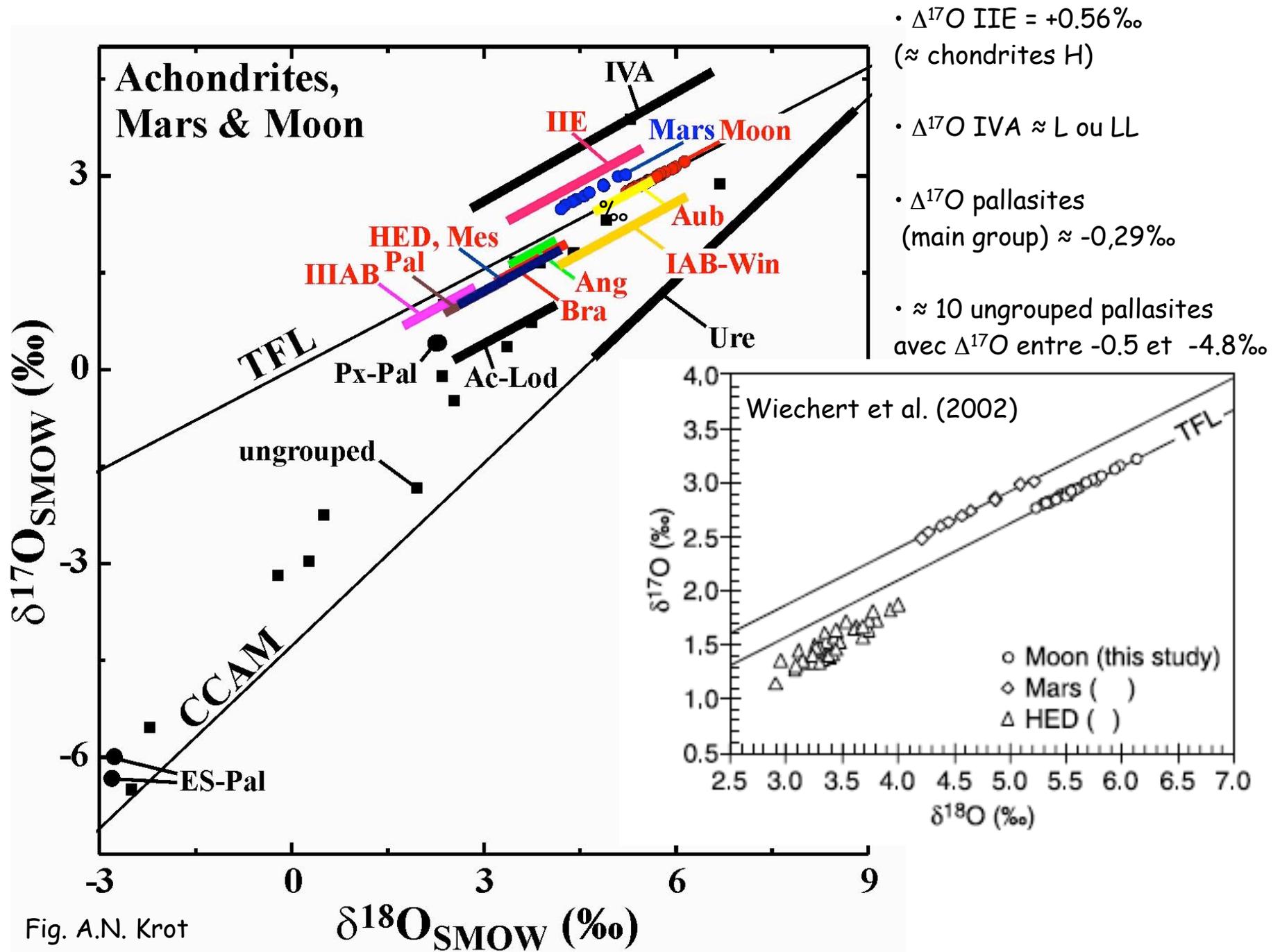
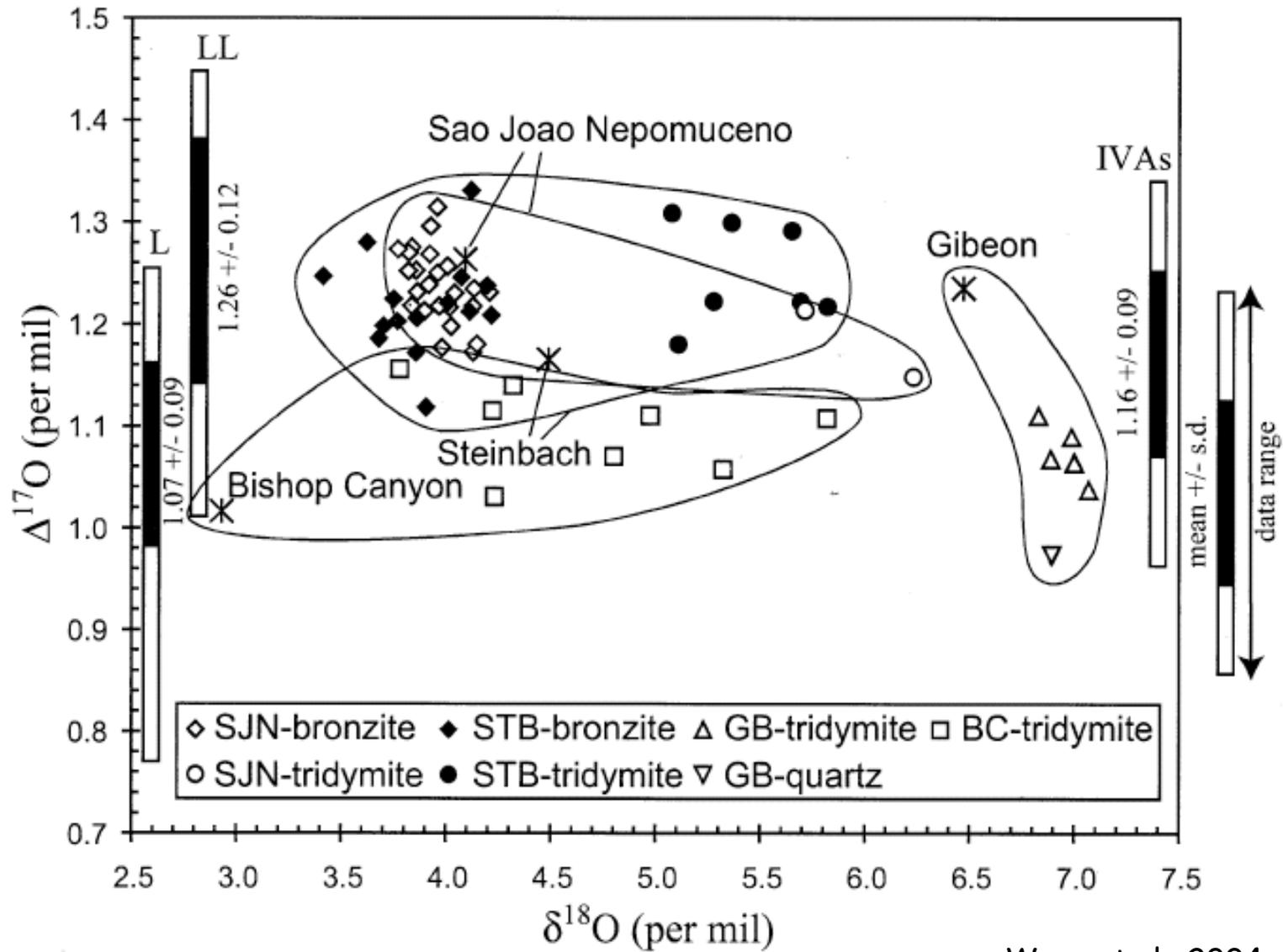


Fig. A.N. Krot



Mesures ultra-précises par laser UV à Carnegie



Wang et al., 2004

- 3 groupes différents de pallasites d'après les  $\Delta^{17}\text{O}$ , et  $\approx 10$  ungrouped
- les pallasites sont des fragments de la limite manteau-noyau dans Vesta !!!
- le problème qui est plus vu pour les mésosidérites : est que les silicates ont pu être introduits par mélange, impact, ... donc pas de signification génétique ?

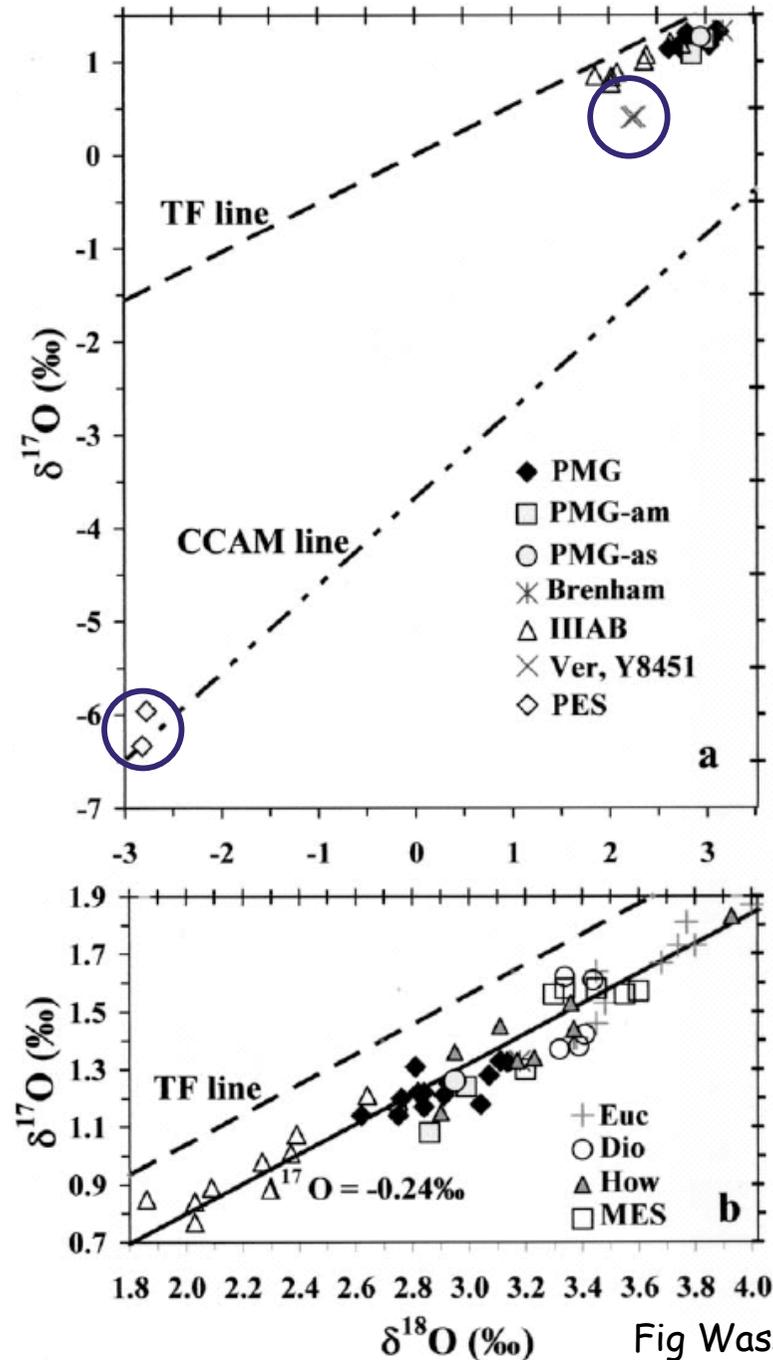
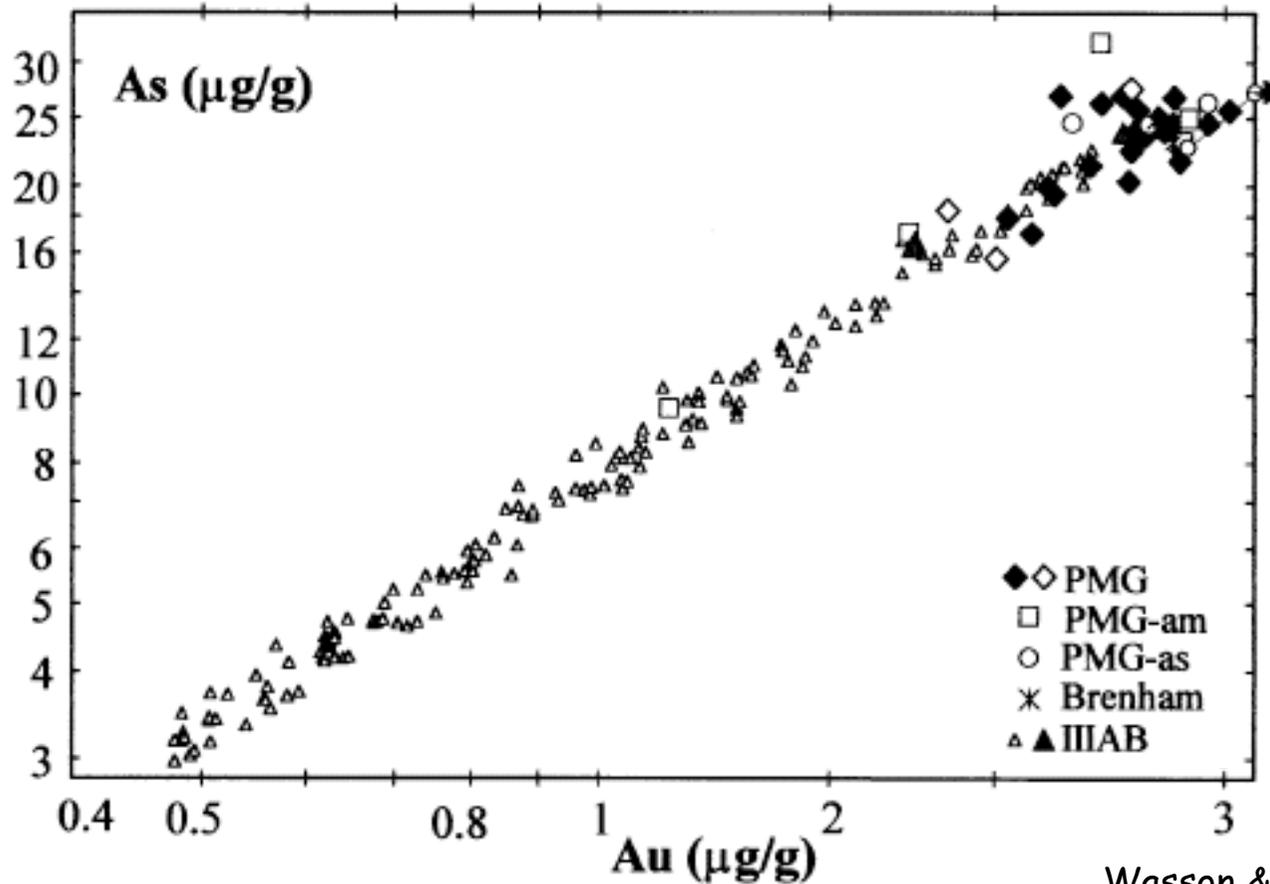


Fig Wasson & Choi 2002  
(données Clayton & Mayeda, 1996)

Le cas des IIIAB est un bon cas d'école car il y en a plus de 200

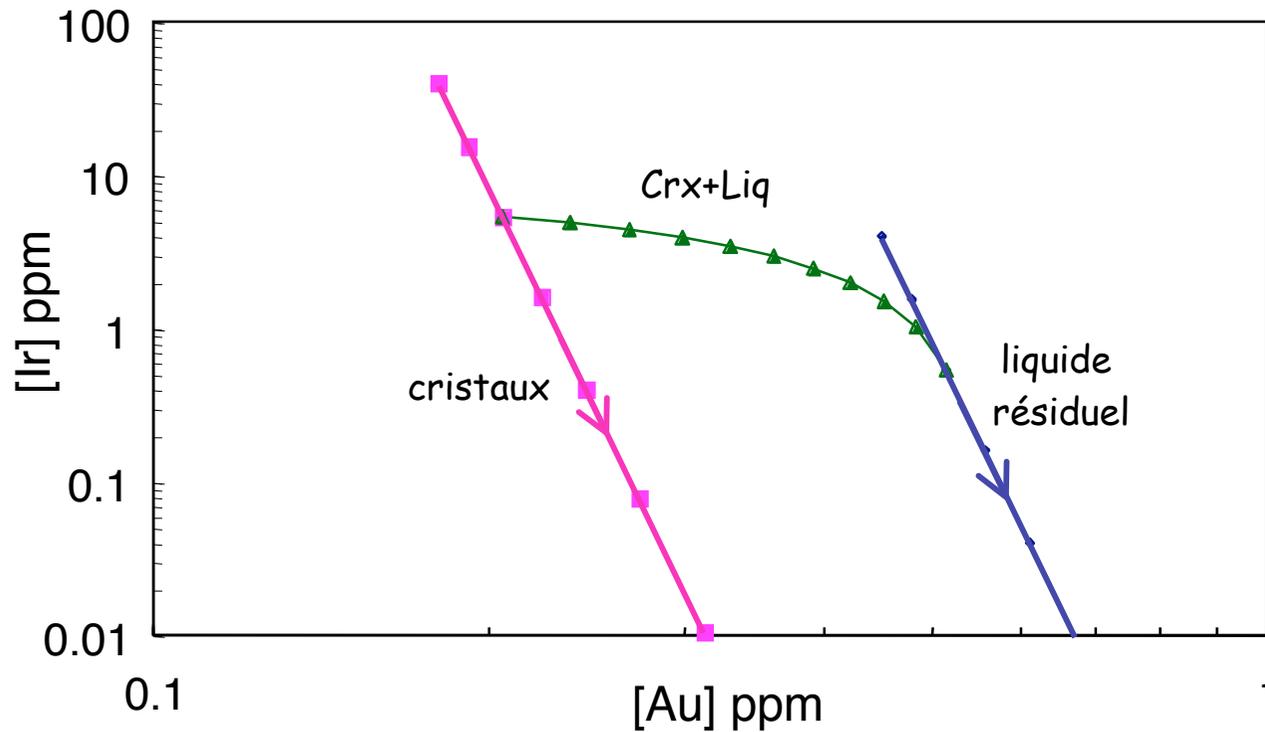
Les pallasites sont liées aux IIIAB : même systématique pour les éléments sidérophiles en traces

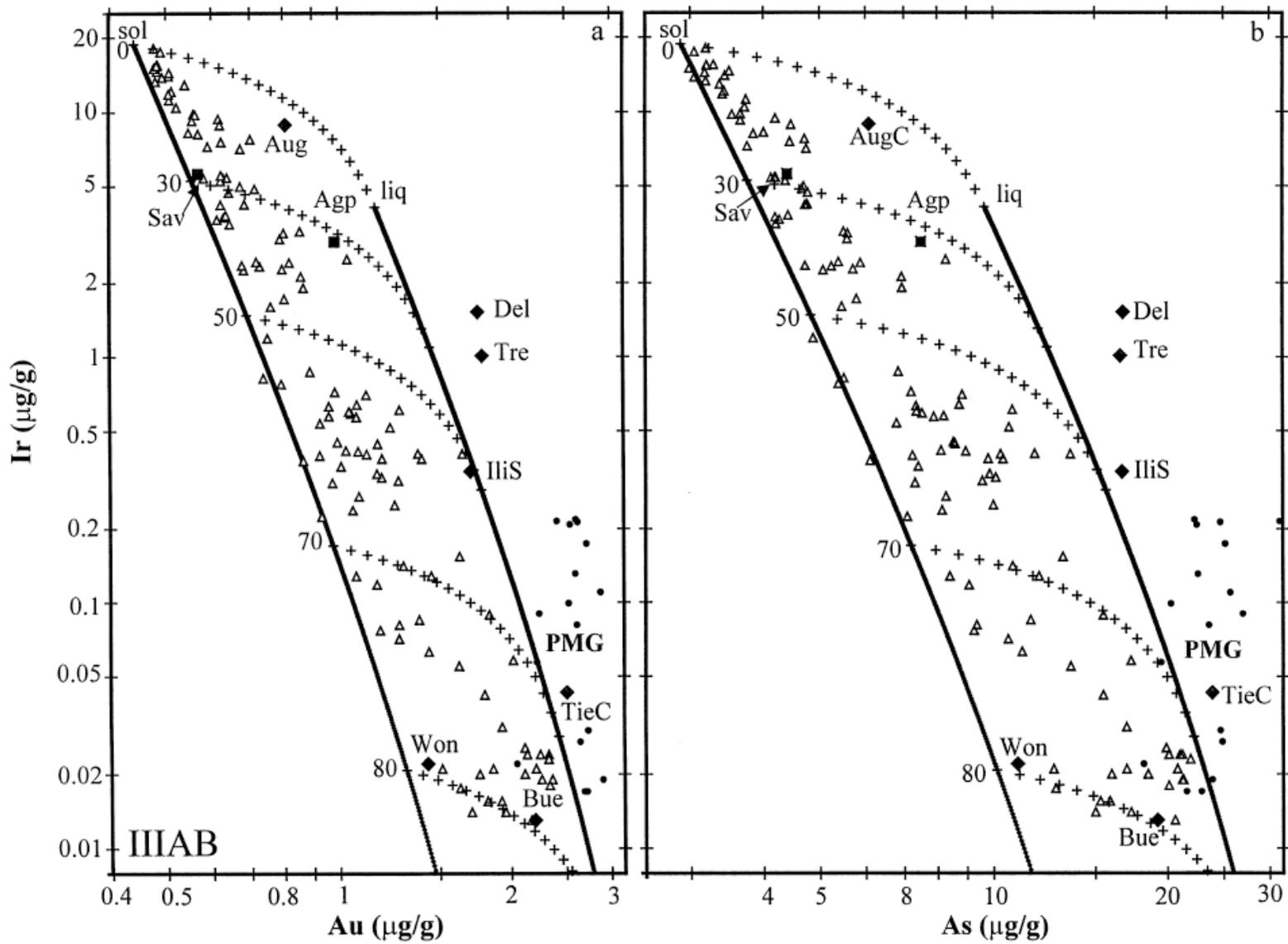


Wasson & Choi, 2003

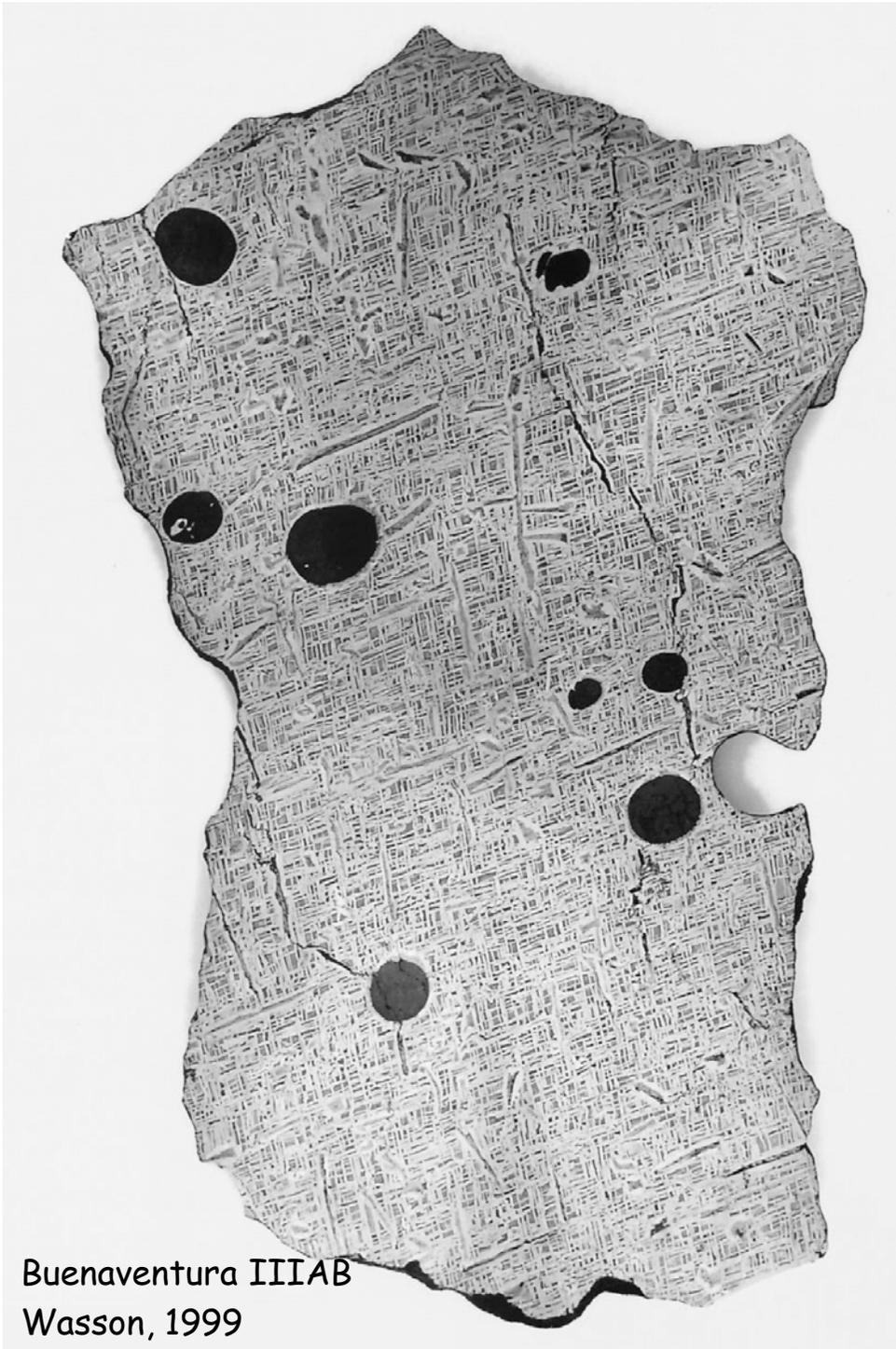
On peut tester dans le détail l'hypothèse d'une origine par cristallisation fractionnée :  
 exemple le plus simple de cristallisation fractionnée

- partage entre métal solide et métal liquide :  $D_{\text{sol-liq}} = \frac{[\text{Ir}]_{\text{sol}}^t}{[\text{Ir}]_{\text{liq}}^t}$
- cristallisation fractionnée (Rayleigh) :  $[\text{Ir}]_{\text{liq}}^t = [\text{Ir}]_{\text{liq}}^0 \times f^{(D_{\text{Ir}}-1)}$

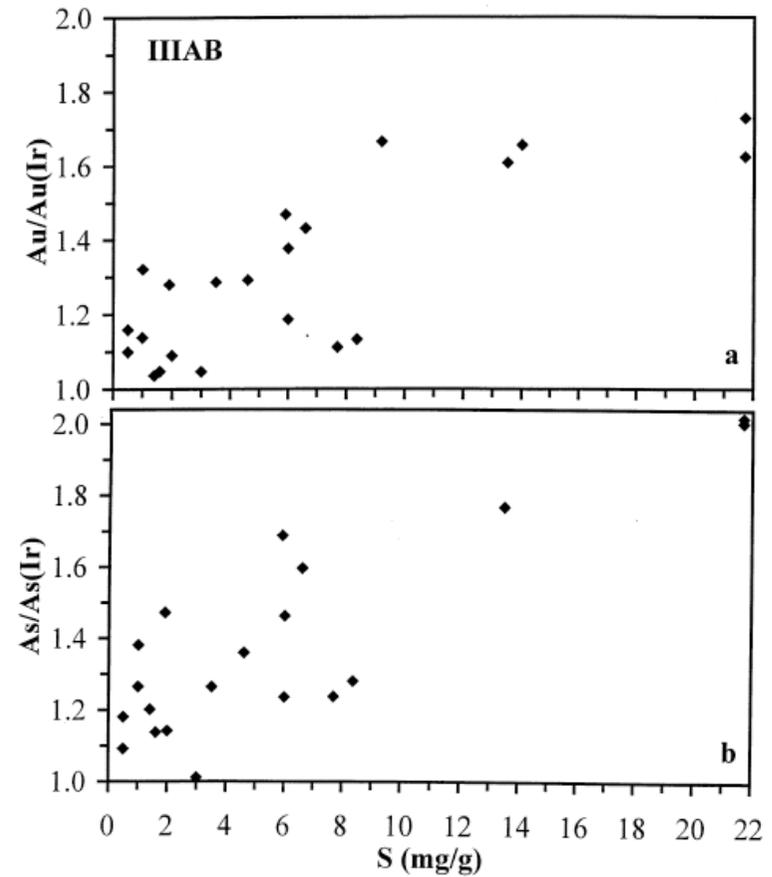




Wasson, 1999

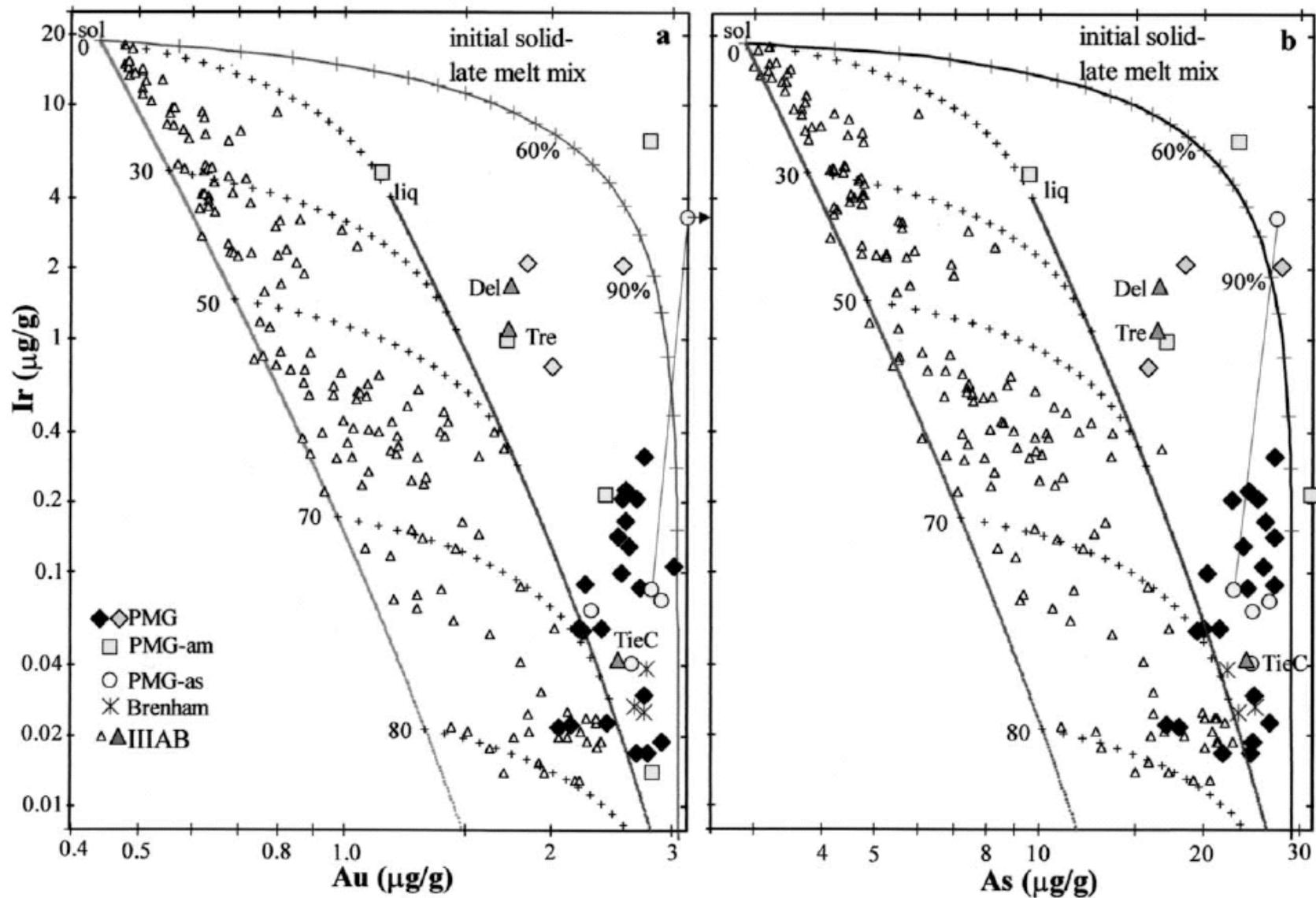


Buenaventura IIIAB  
Wasson, 1999



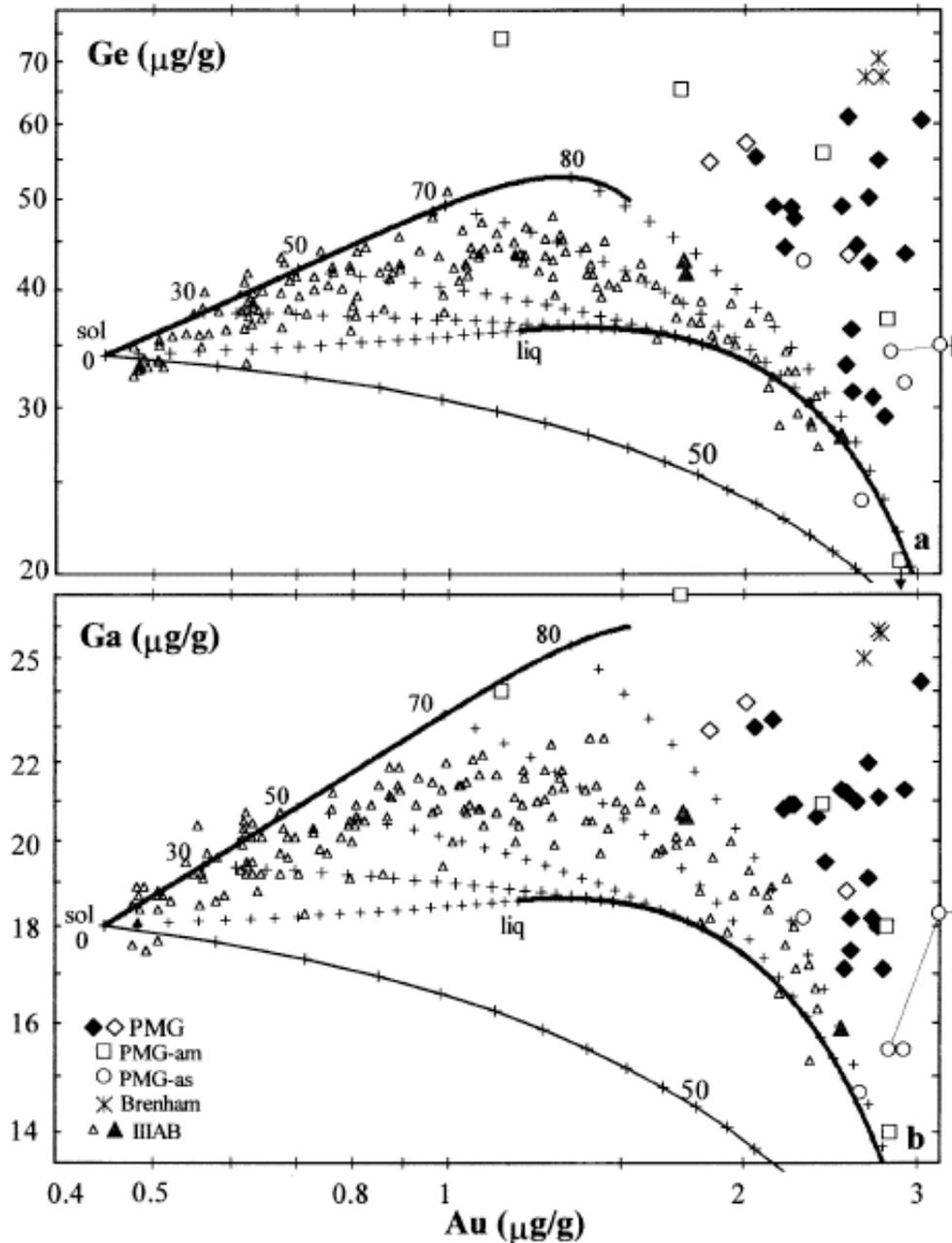
Comme le S est très incompatible et forme un liquide FeS, la proportion de globules de FeS est une mesure de la fraction de liquide métallique qui est restée mélangée aux cristaux de FeNi.

Origine du métal des main group pallasites par un mélange entre un liquide non fractionné et des cristaux de fin de cristallisation fractionnée



• Mais problème quand même car ca ne permet pas d'expliquer les [Ga] et [Ge] des pallasites.

• d'où viennent le Ga et le Ge ?  
gaz, fluide ?



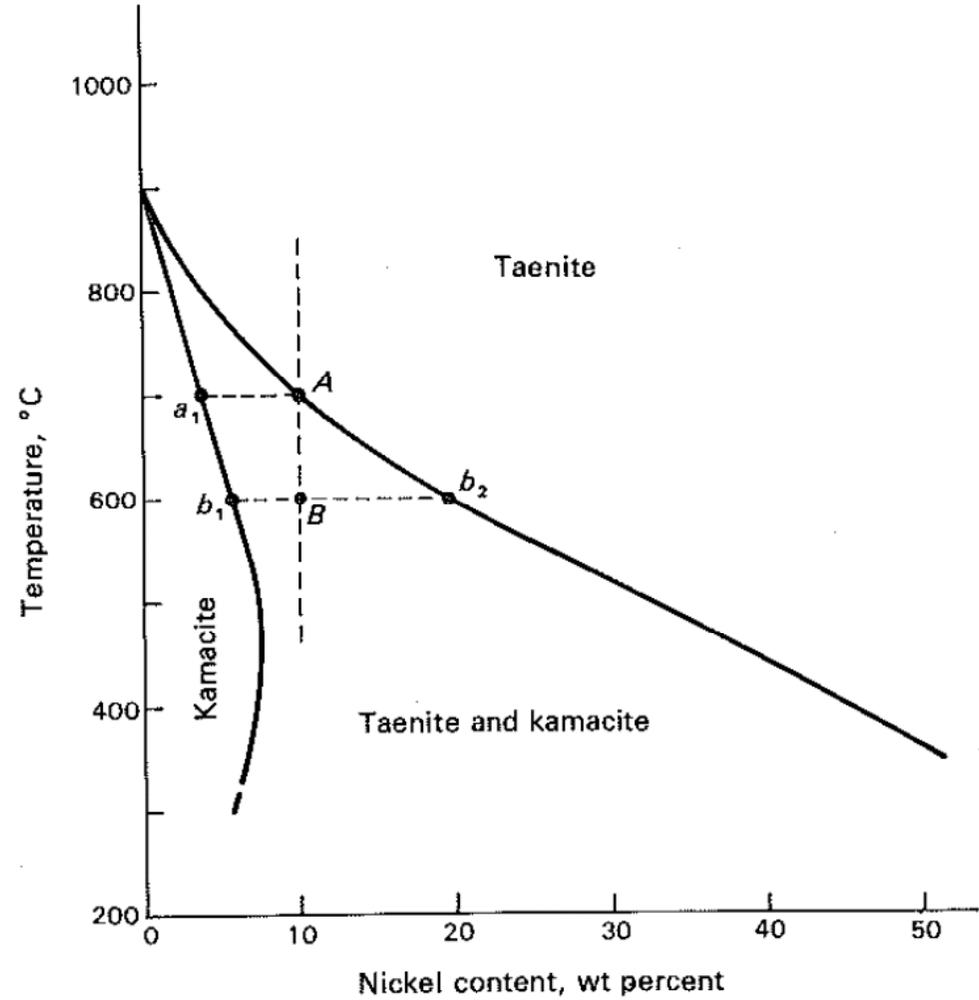
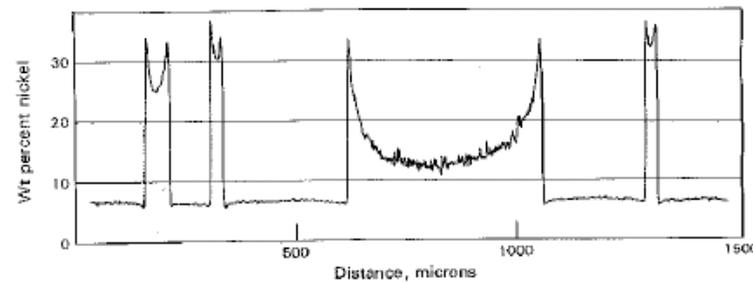
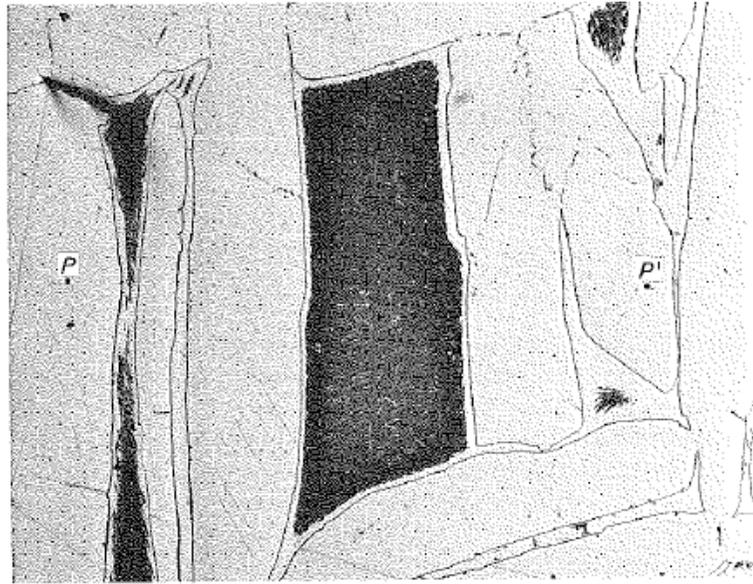
Grâce aux taux de refroidissement on peut espérer mieux comprendre

- L'étude des taux de refroidissement ce n'est pas "juste" pour connaître l'histoire thermique (la profondeur, la taille du corps parent, ...)
- L'étude des taux de refroidissement c'est aussi d'abord un moyen d'apparier les objets:
  - par ex : un problème qui a été identifié dès le début est la gamme d'un facteur  $\approx 10$  de taux de refroidissement des IIIAB : impossible si tous ces objets se sont refroidis dans le coeur d'un même corps parent
  - pb idem pour l'origine des pallasites si à la limite noyau-manteau

Citation (de mémoire) de Joe Goldstein durant sa conférence à la MetSoc de 2008 lors de la remise de sa médaille Leonard (pour la détermination des taux de refroidissement des météorites de fer) :

*“ Il va falloir que je prenne ma retraite bientôt sinon les météorites de fer vont finir par se refroidir beaucoup trop vite”*

# Détermination des taux de refroidissement entre 700 et 500°C : le principe (faux !)

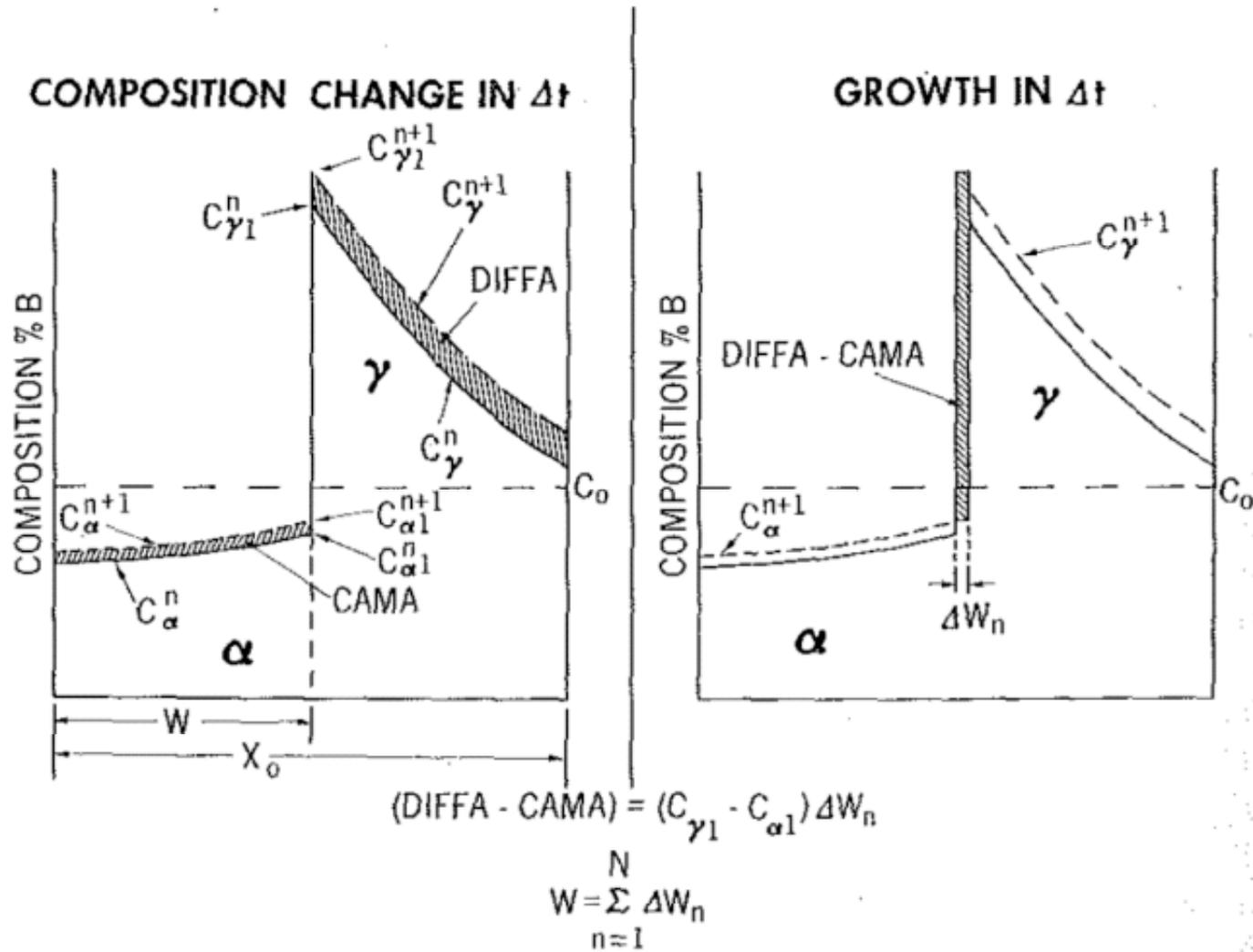


la diffusion du Ni dépend du trajet temps-température

## Trois méthodes classiques et une plus récente :

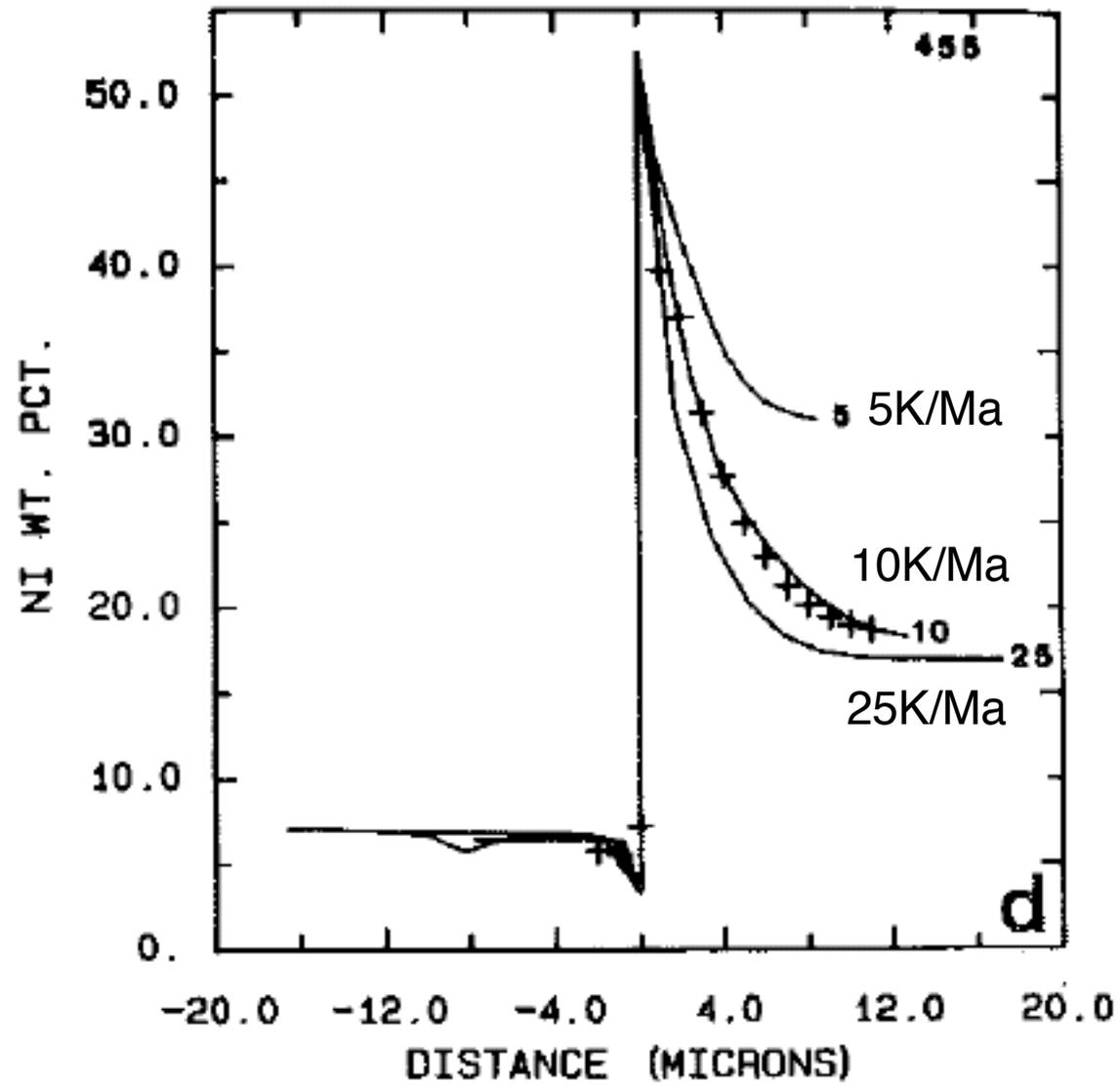
- Relation entre la [Ni] au centre de la lamelle de taenite et la demi-largeur de la lamelle (méthode de Wood, 1964)
- Ajustement du profil de diffusion du Ni à l'interface taenite-kamacite (méthode de Goldstein & Ogilvie, 1965)
- Largeur des bandes de kamacite (méthode de Goldstein & Short, 1967)
- Taille des particules riches en Ni dans les « cloudy zones » de taenite (méthode de Yang, Williams & Goldstein, 1997).

$$W_n \times C_\alpha^n + (X_0 - W_n) \times C_\gamma^n = (W_n + \Delta W_n) \times C_\alpha^{n+1} + (X_0 - W_n - \Delta W_n) \times C_\gamma^{n+1}$$

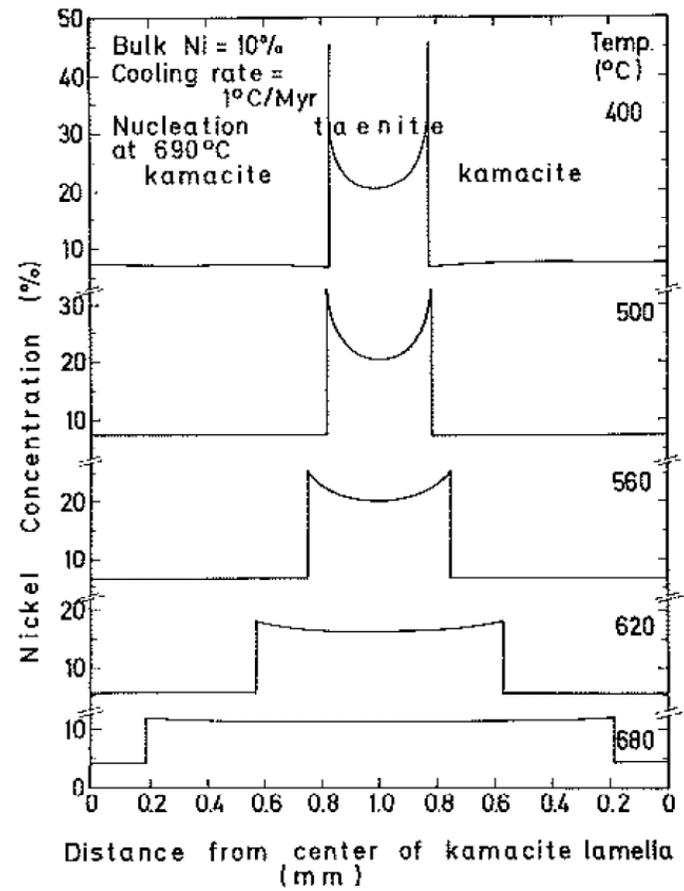
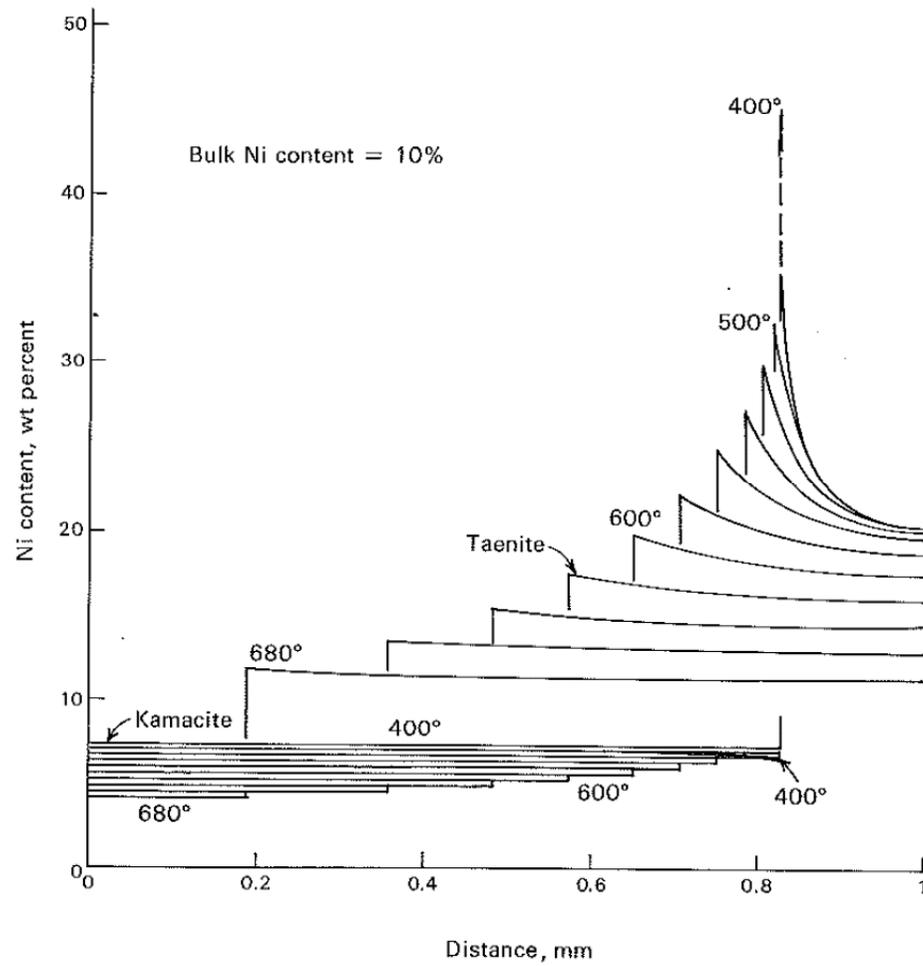


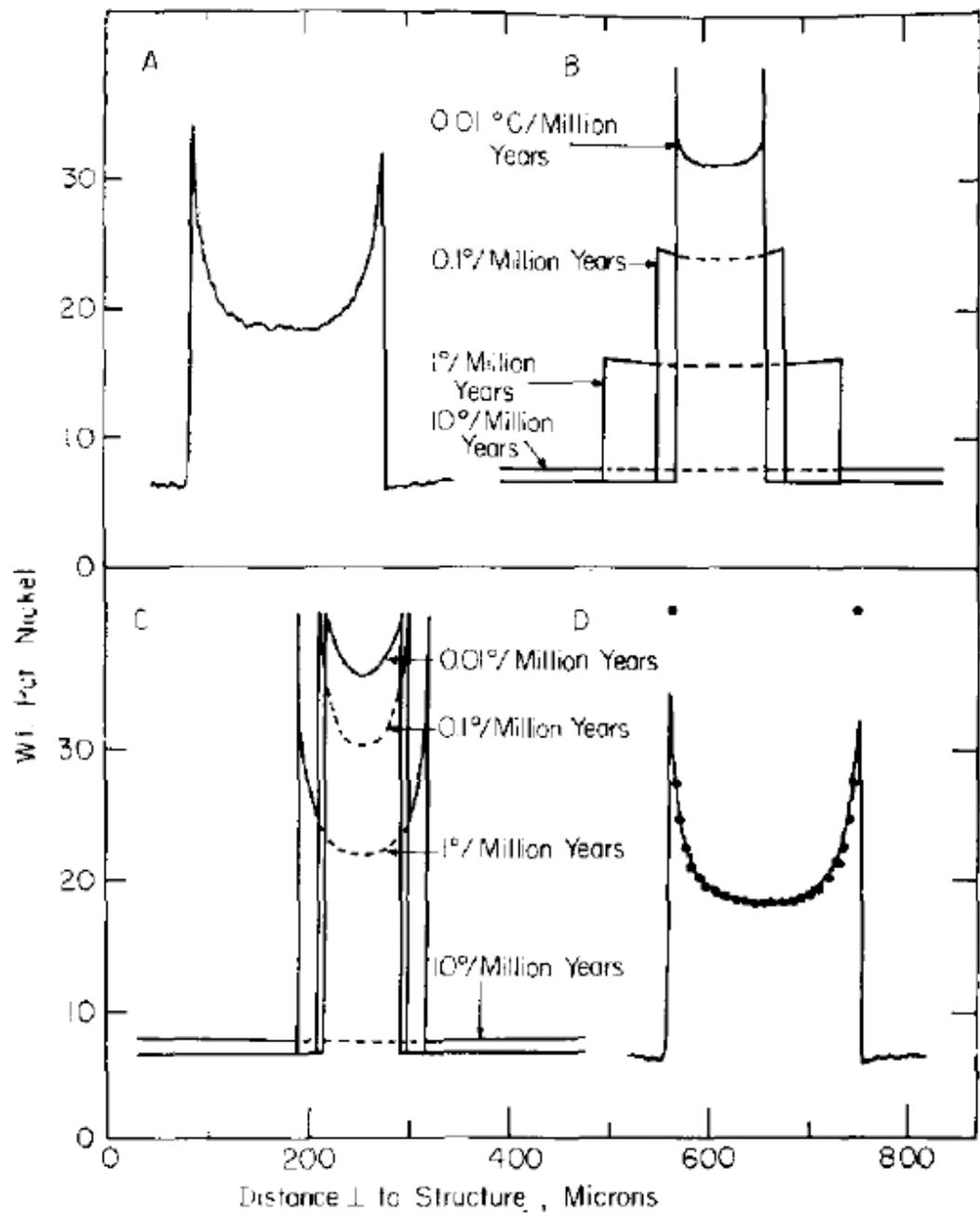
Goldstein & Ogilvie, 1965





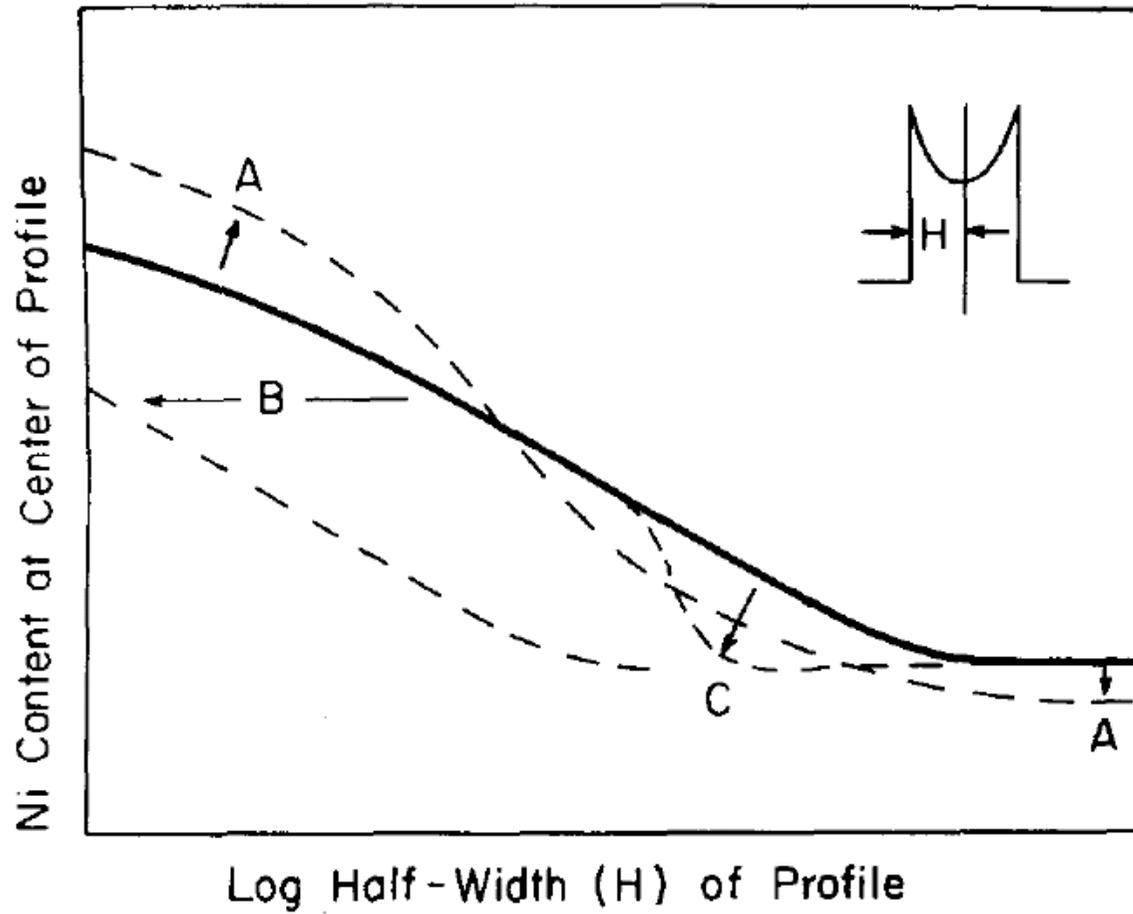
Saikumar & Goldstein, 1988

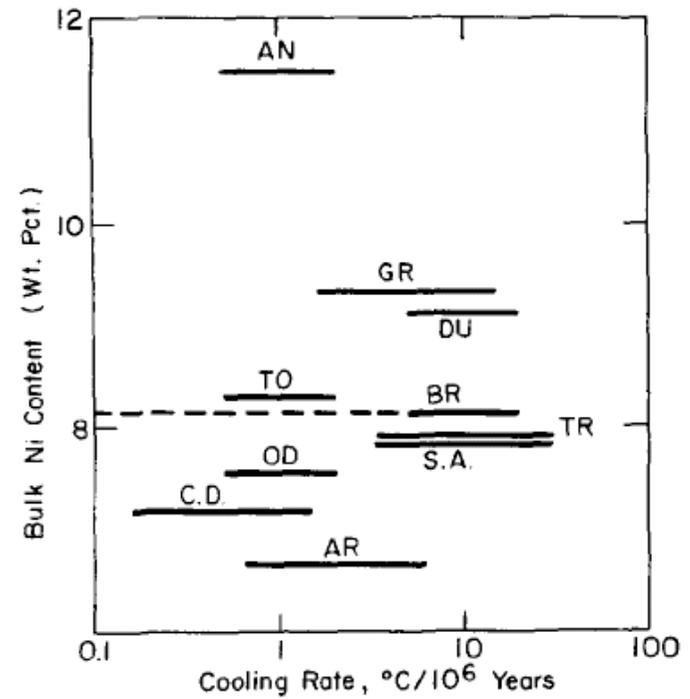
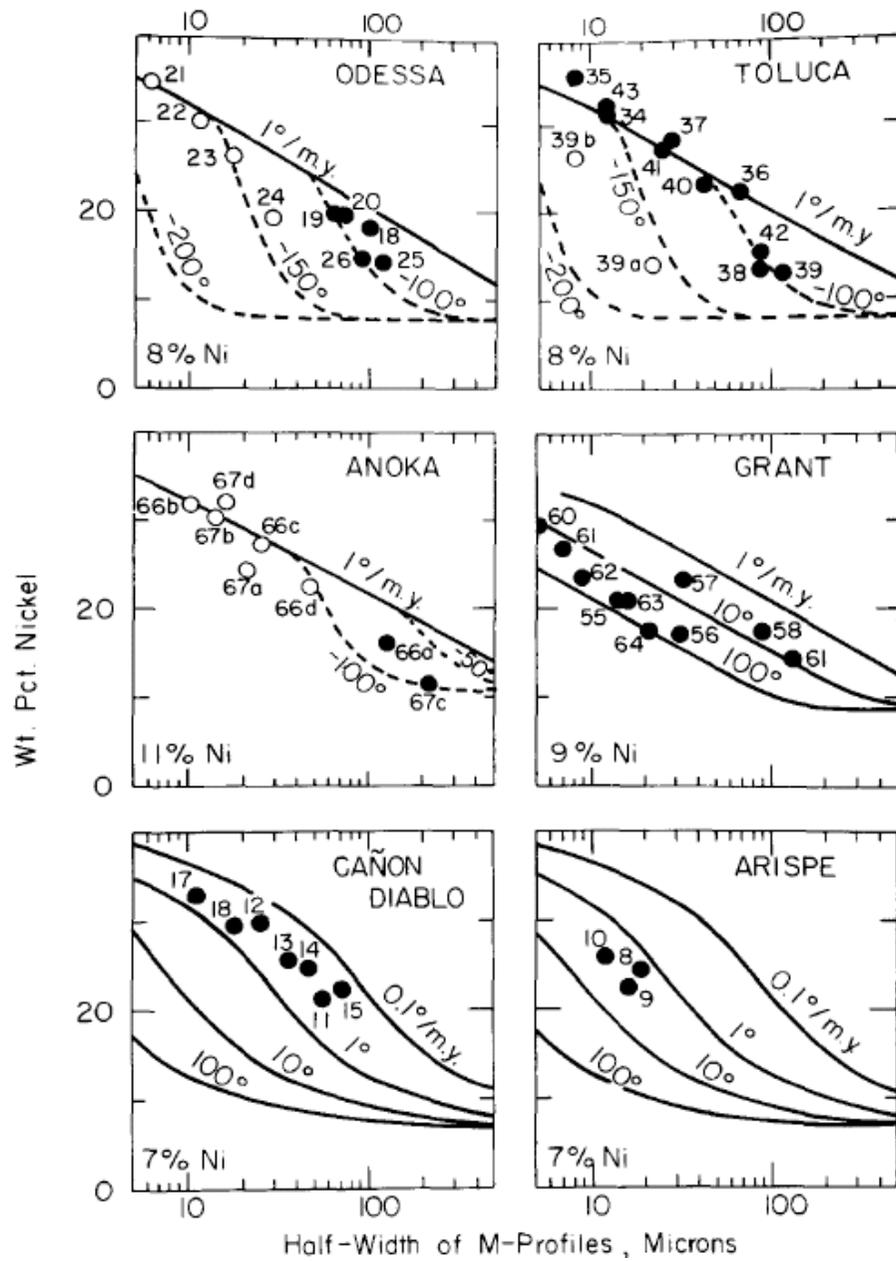




Wood, 1964

- A : diminution de la teneur en Ni
- B : augmentation du taux de refroidissement
- C : diminution de la température de nucléation





Wood, 1964

A partir des taux de refroidissements on peut remonter à une taille de corps parent ou à une profondeur dans un corps parent

Il faut spécifier les conditions initiales :

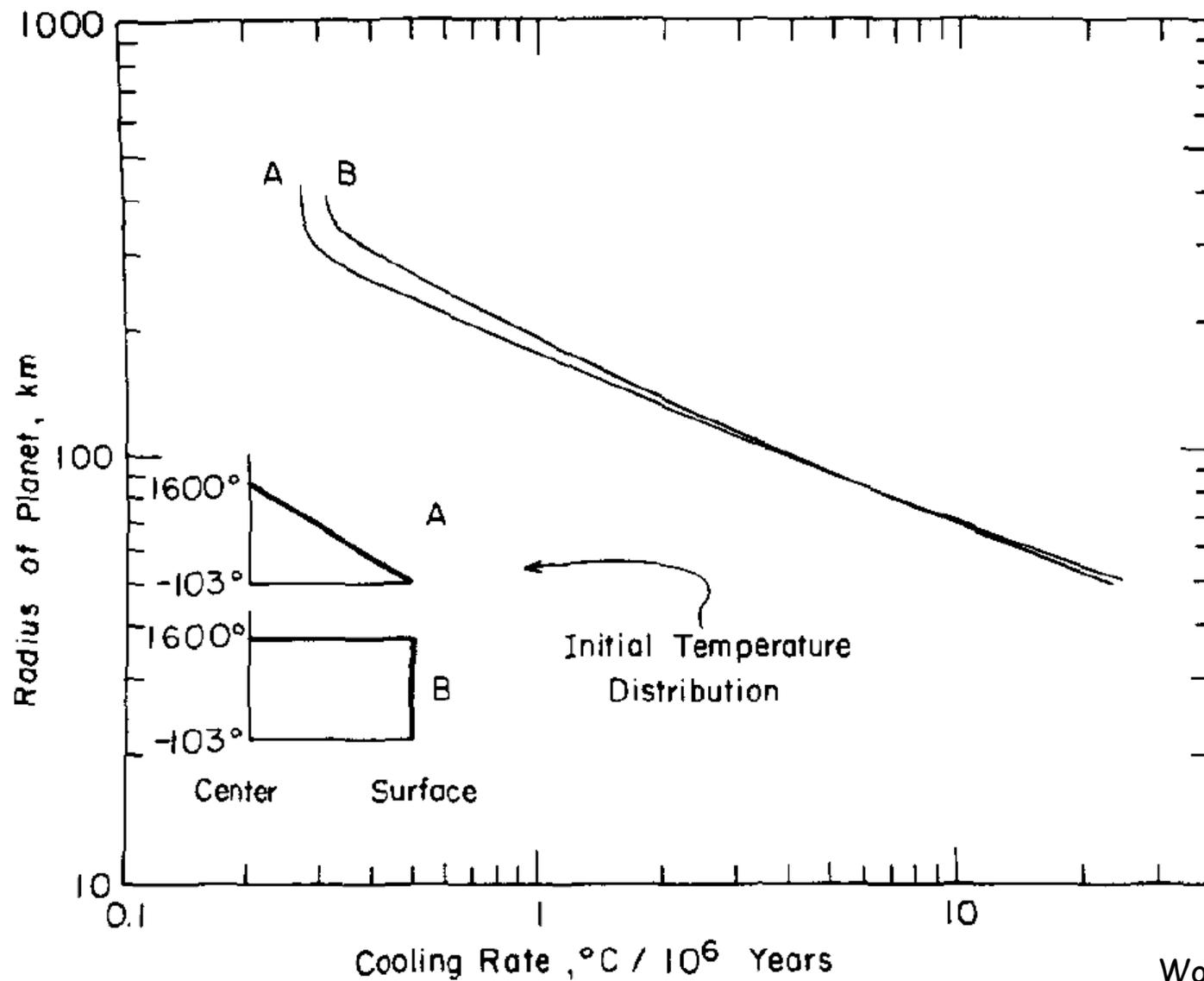
- profil de température initial (et donc structure initiale du corps parent, température de surface, ...)
- source de chaleur
  - chauffage interne (radioactivités longue période et/ou radioactivités courte période)
  - chauffage externe (énergie libérée par les collisions, rayonnement émis par le Soleil jeune)
- histoire d'accrétion et d'évolution de l'objet (fragmentation, ...)

On résout l'équation de diffusion de la chaleur pour les conditions choisies:  
par exemple pour une diffusion avec une production radioactive dans la masse :

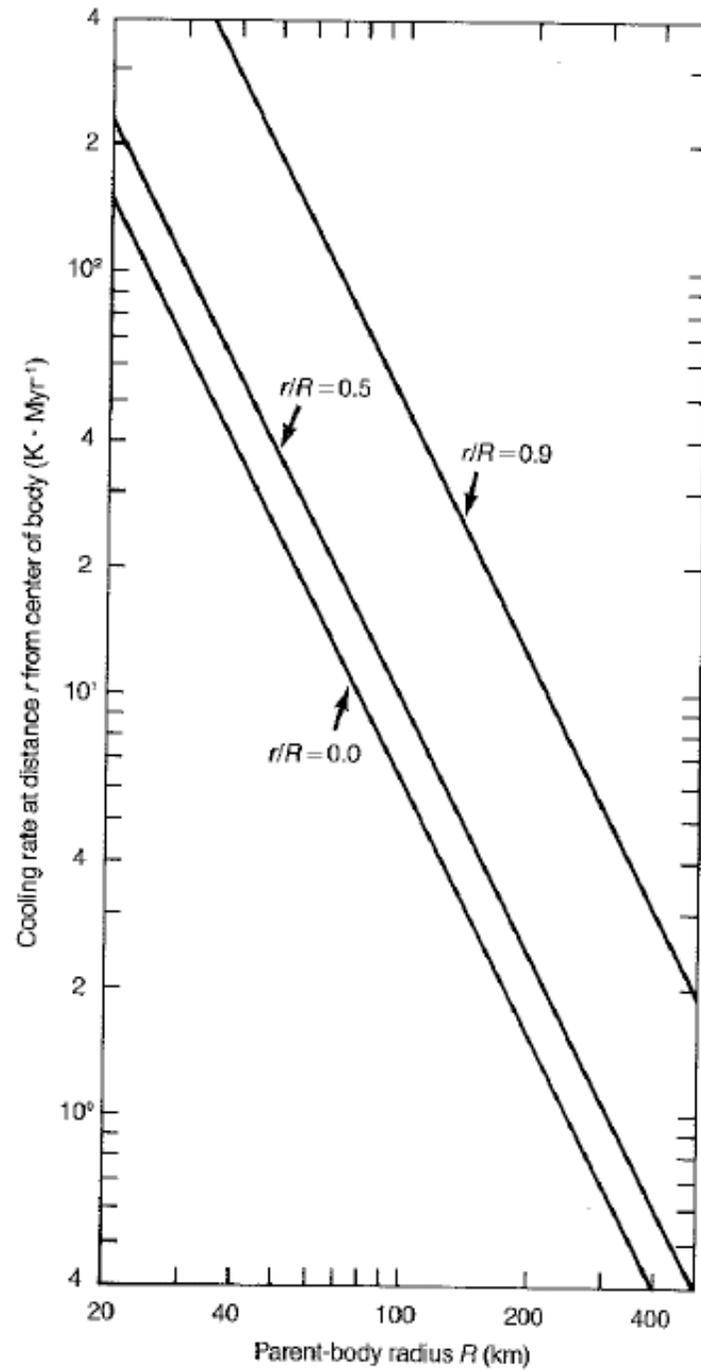
$$\frac{1}{\kappa} \frac{dT}{dt} = \frac{d^2T}{dy^2} - \frac{A_0}{k} \exp^{-\lambda t}$$

(livre de Carslaw & Jeager pour les solutions dans les différents cas)

Ex : temps de refroidissement à 500 °C au cœur d'une planète de composition chondritique chauffée par K, U et Th



Wood, 1964



Un autre exemple à différentes profondeurs

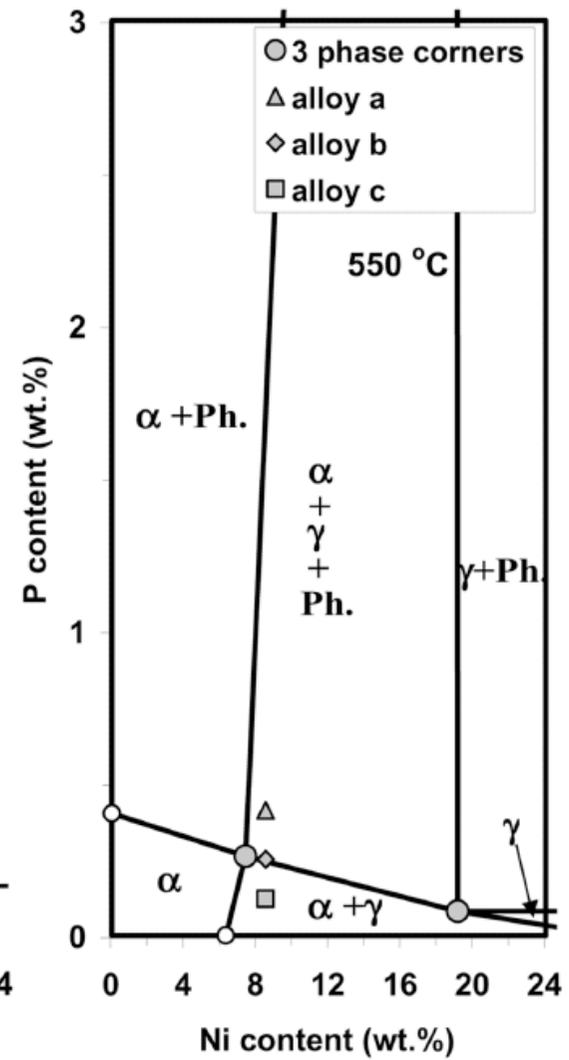
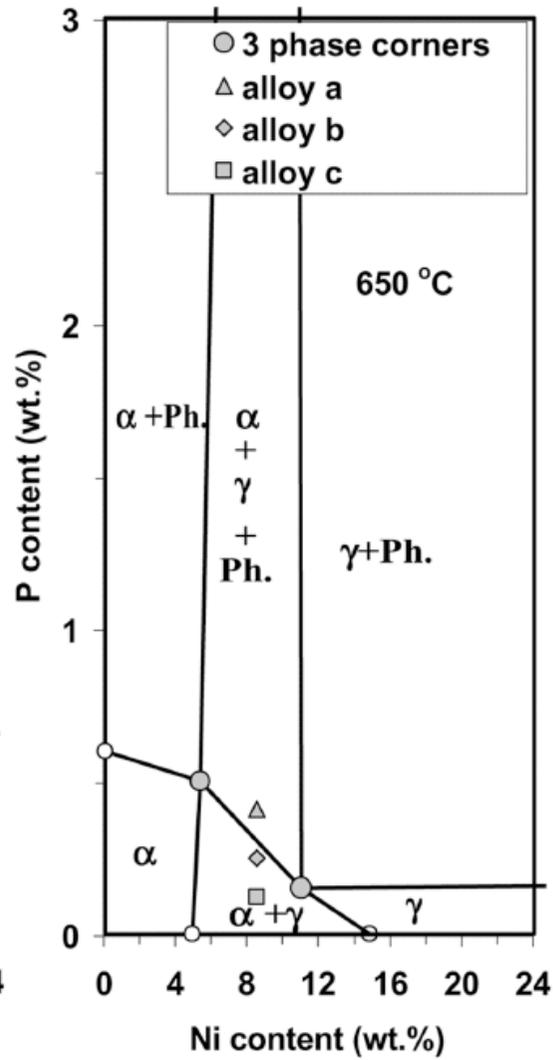
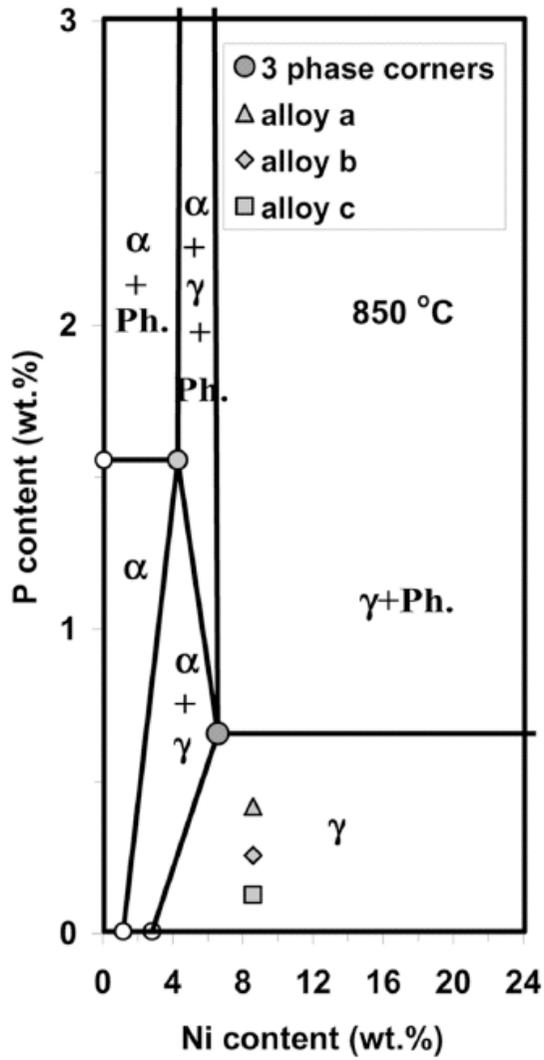
Wasson 1985

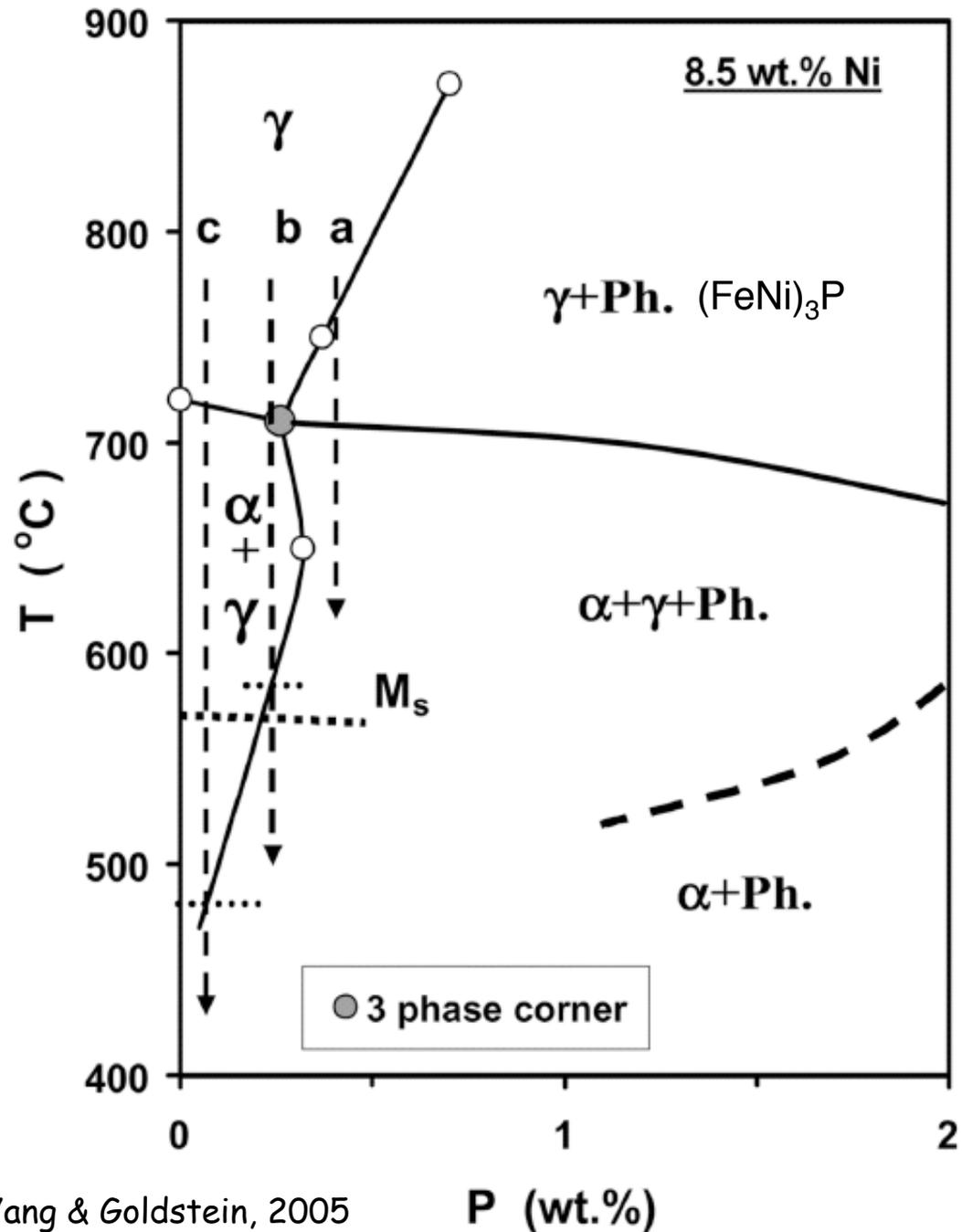
Toutes les méthodes de mesure des taux de refroidissement reposent sur :

- les mécanismes réels de formation de la texture de Widmanstätten
- la température de nucléation de la kamacite
- la possibilité d'empiètement d'un profil de diffusion sur un autre
- les diagrammes de phase Fe-Ni ou Fe-Ni-P
- les coefficients de diffusion du Ni

Et les expériences ont montré que par exemple :

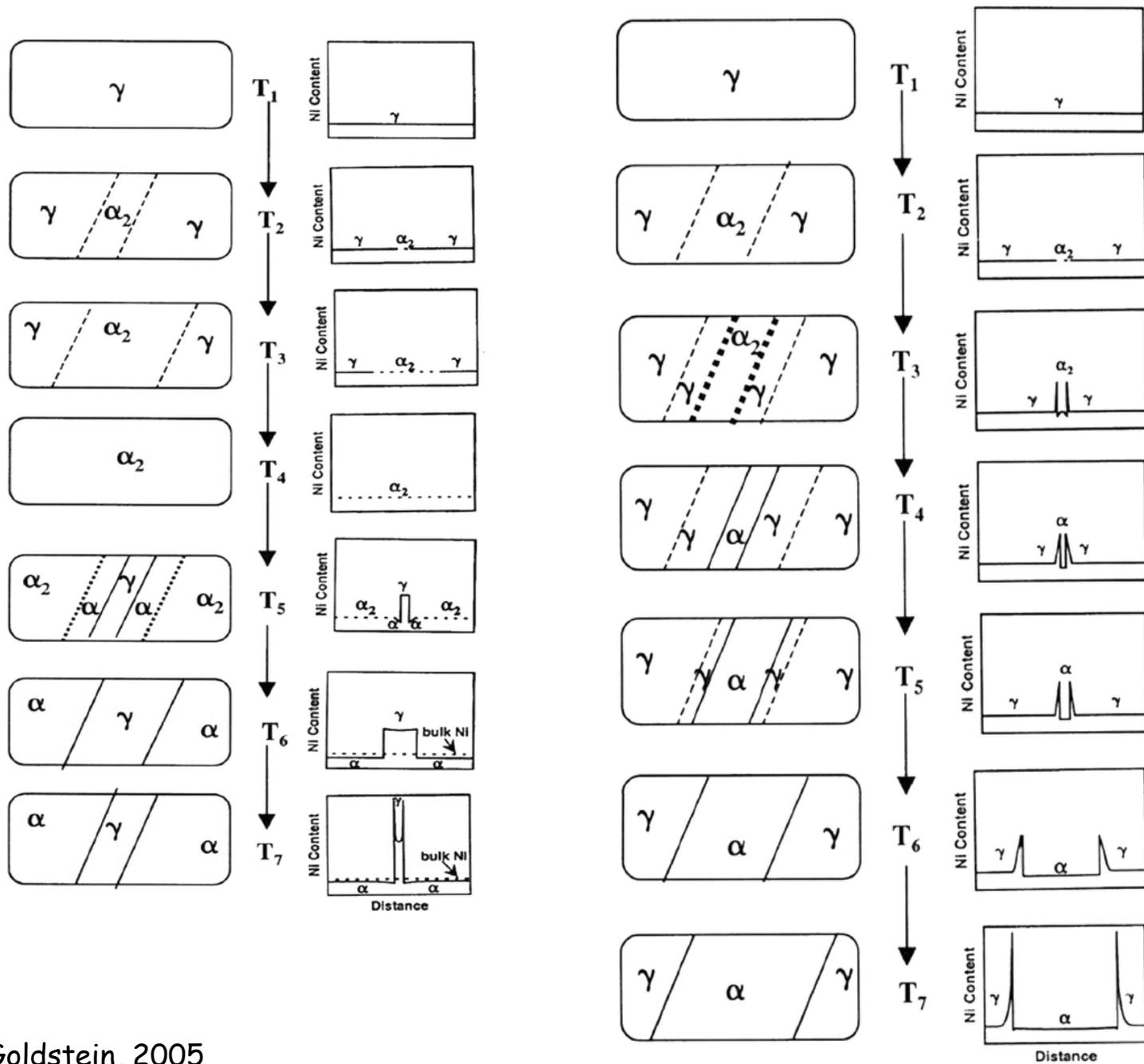
- il n'est pas possible de former de la kamacite directement à partir de la taenite sans passer par de la martensite
- le diagramme de phase du Fe-Ni dépend très fortement du P



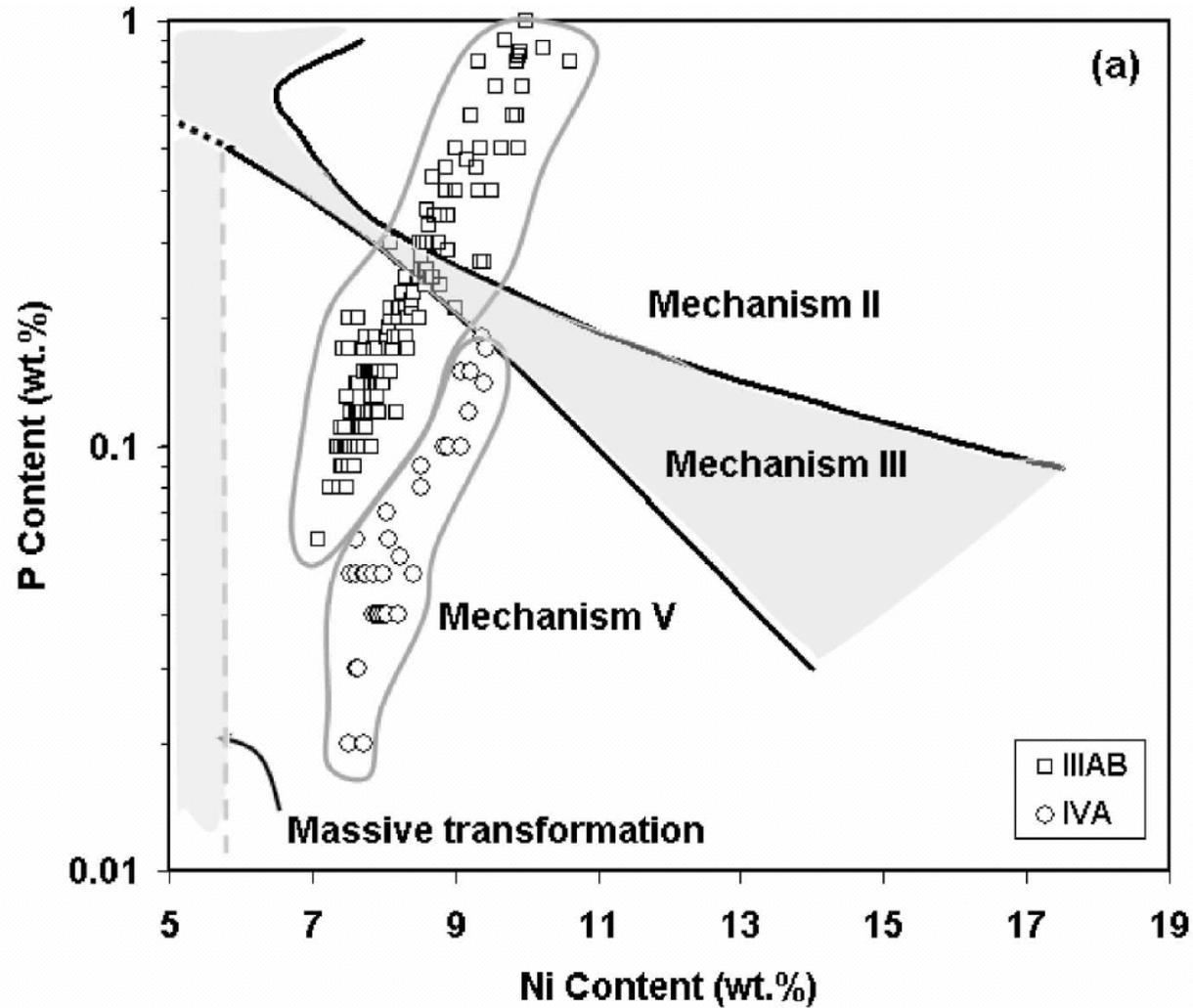


**5 mécanismes :**

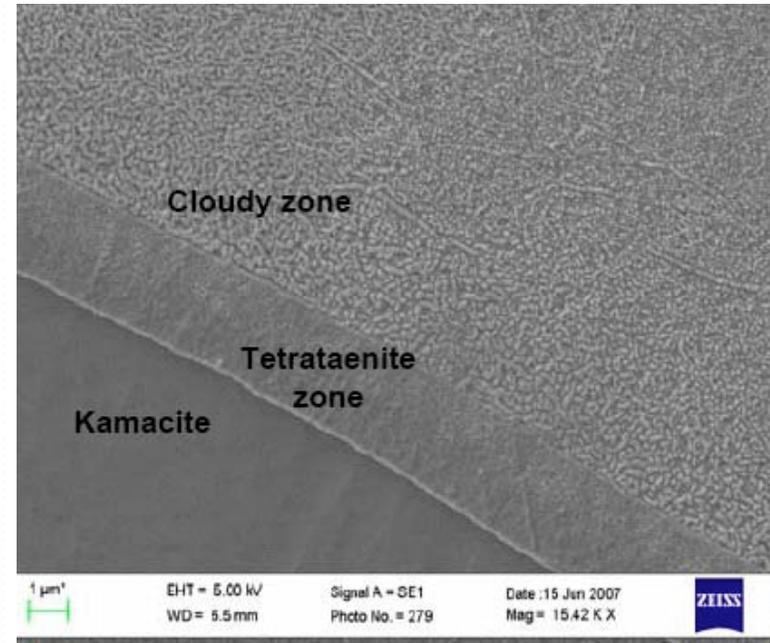
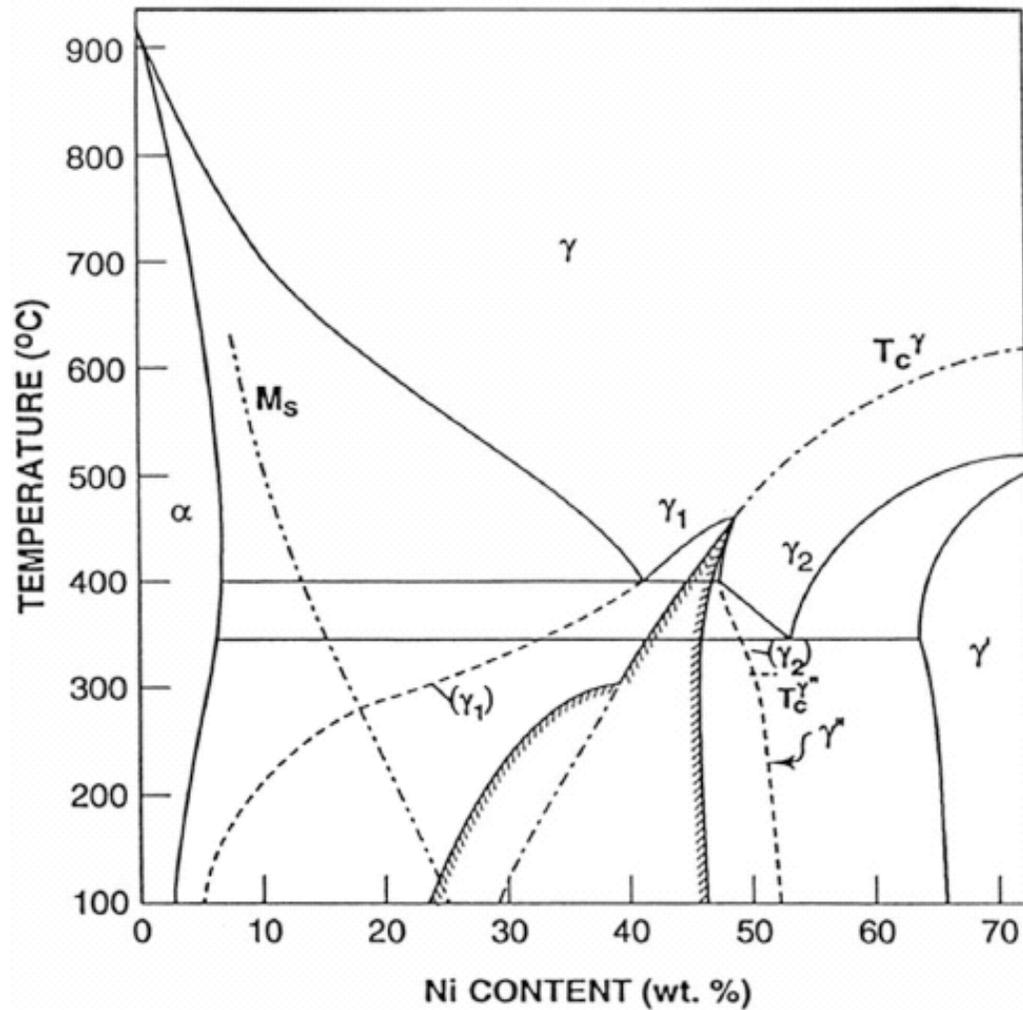
- I :  $\gamma \rightarrow \alpha + \gamma$  (ne marche pas)
- II :  $\gamma \rightarrow \gamma + \text{Ph} \rightarrow \alpha + \gamma + \text{Ph}$
- III :  $\gamma \rightarrow (\alpha + \gamma) \rightarrow \alpha + \gamma + \text{Ph}$
- IV :  $\gamma \rightarrow \alpha_2 \rightarrow \alpha + \gamma$
- V :  $\gamma \rightarrow \alpha_2 + \gamma \rightarrow \alpha + \gamma$



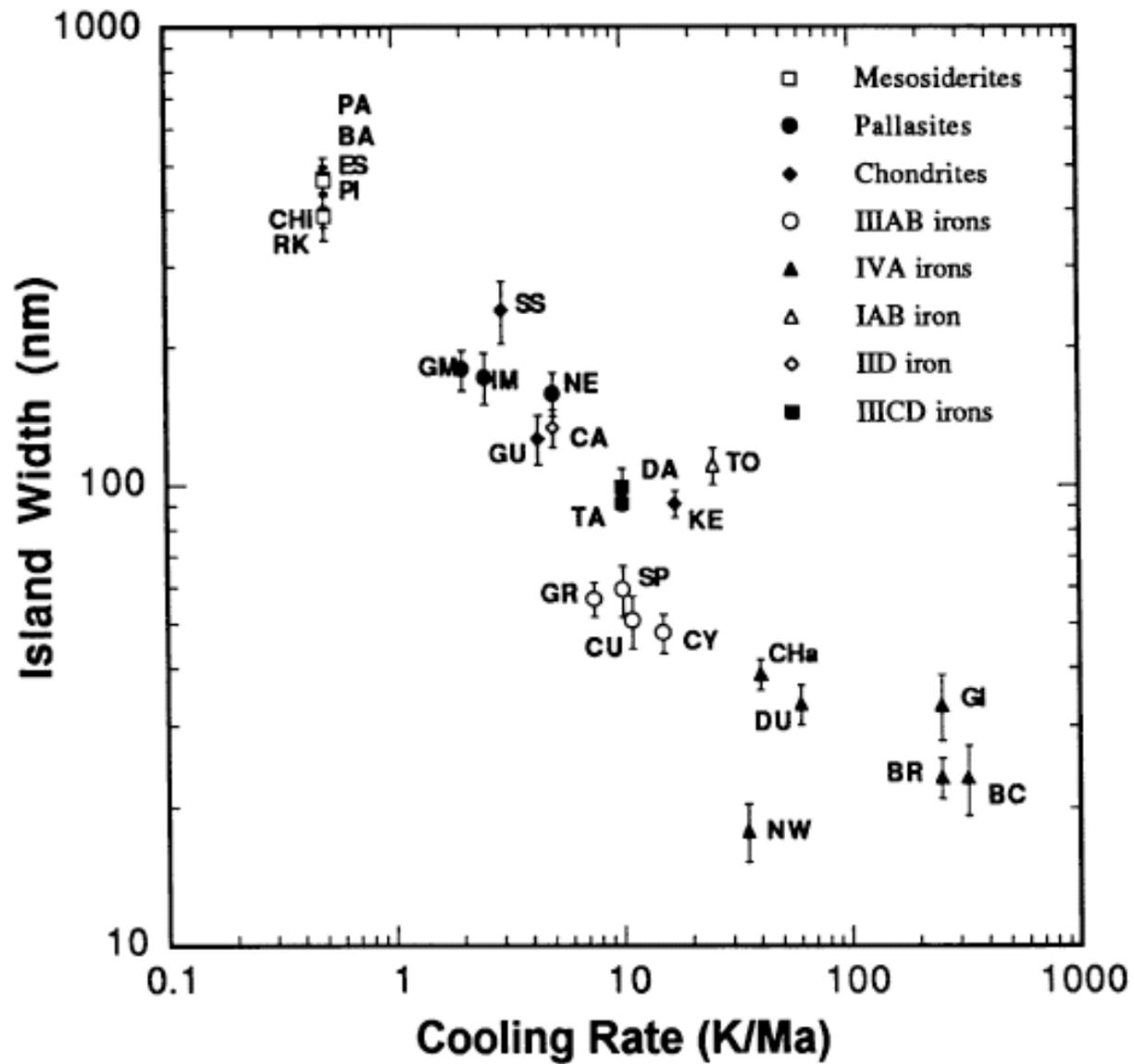
On peut déterminer le "bon" mécanisme de formation de la texture de Widmanstätten en fonction des [Ni] et [P] et à partir de là calculer un taux de refroidissement plus juste



Enfin, une nouvelle méthode (cloudy zone) a été développée pour établir des taux de refroidissement entre 400 et 300°C



Yang et al., 1997



Yang et al., 1997

Quelques résultats de tous ces travaux :

- les taux de refroidissement des IIIAB restent "trop" variables : entre  $56^{\circ}\text{C}/\text{Ma}$  (de 35 à 70) et  $338^{\circ}\text{C}/\text{Ma}$  (de 190 à 600)

*C'est impossible dans un noyau d'un même corps parent isolé de l'extérieur par un manteau et une croûte ???*

*exposition d'une partie du noyau proche de la surface ?*

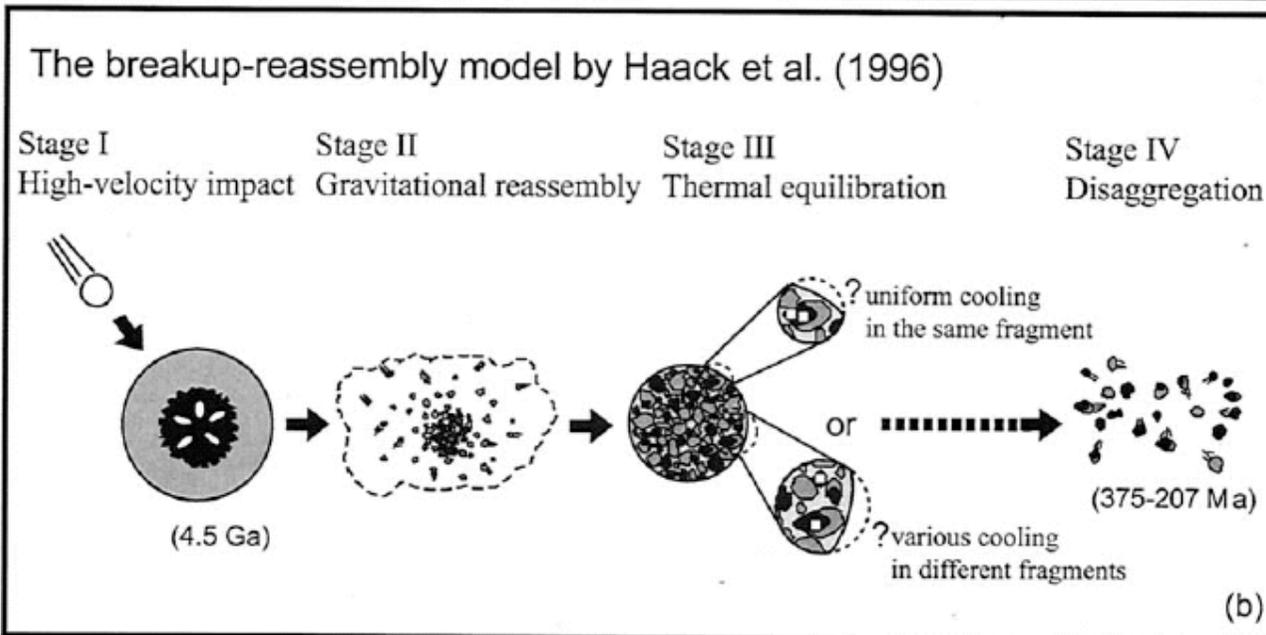
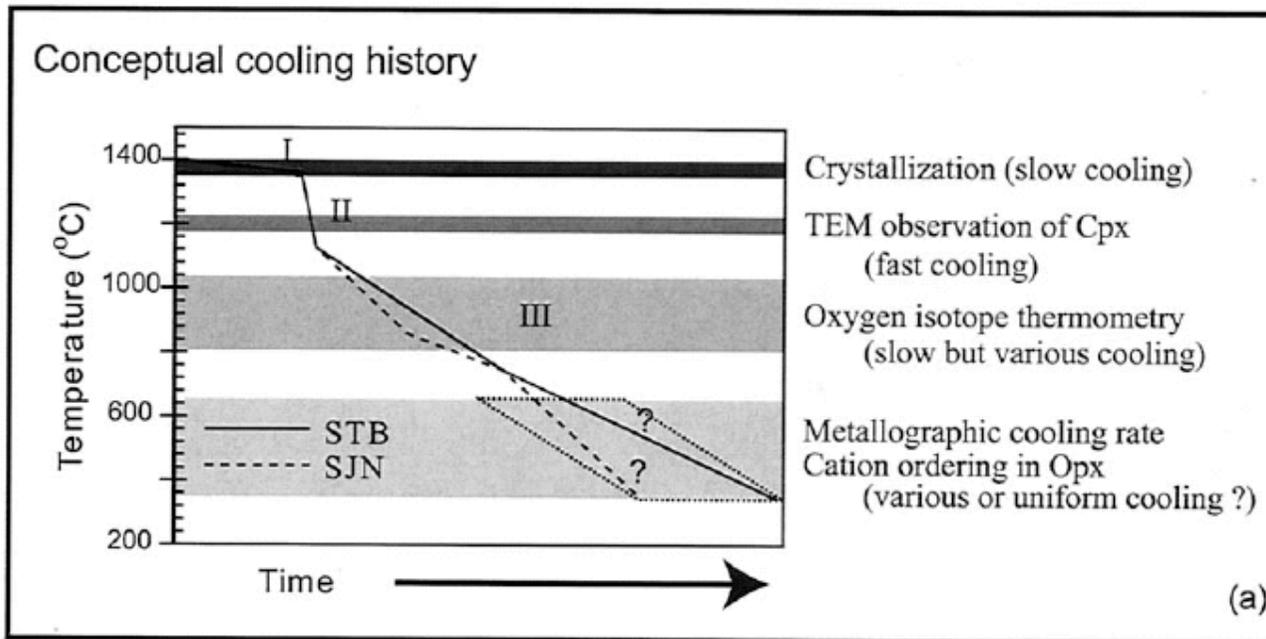
- les taux de refroidissement des pallasites sont "trop lents" : entre 1,7 et  $10^{\circ}\text{C}/\text{Ma}$

*C'est impossible si les MPG pallasites sont bien un analogue d'une couche D" coincée entre le noyau et le manteau*

*Si les pallasites ont bien cristallisé dans le même corps que les IIIAB, elles se sont refroidies ailleurs !*

- les taux de refroidissement des IVA sont tellement rapides ( $\approx 6000^{\circ}\text{C}/\text{Ma}$ ) qu'il faut qu'elles se soient refroidies au contact avec la surface

*Noyau qui a perdu son manteau (collisions)*



# A prendre avec des pincettes

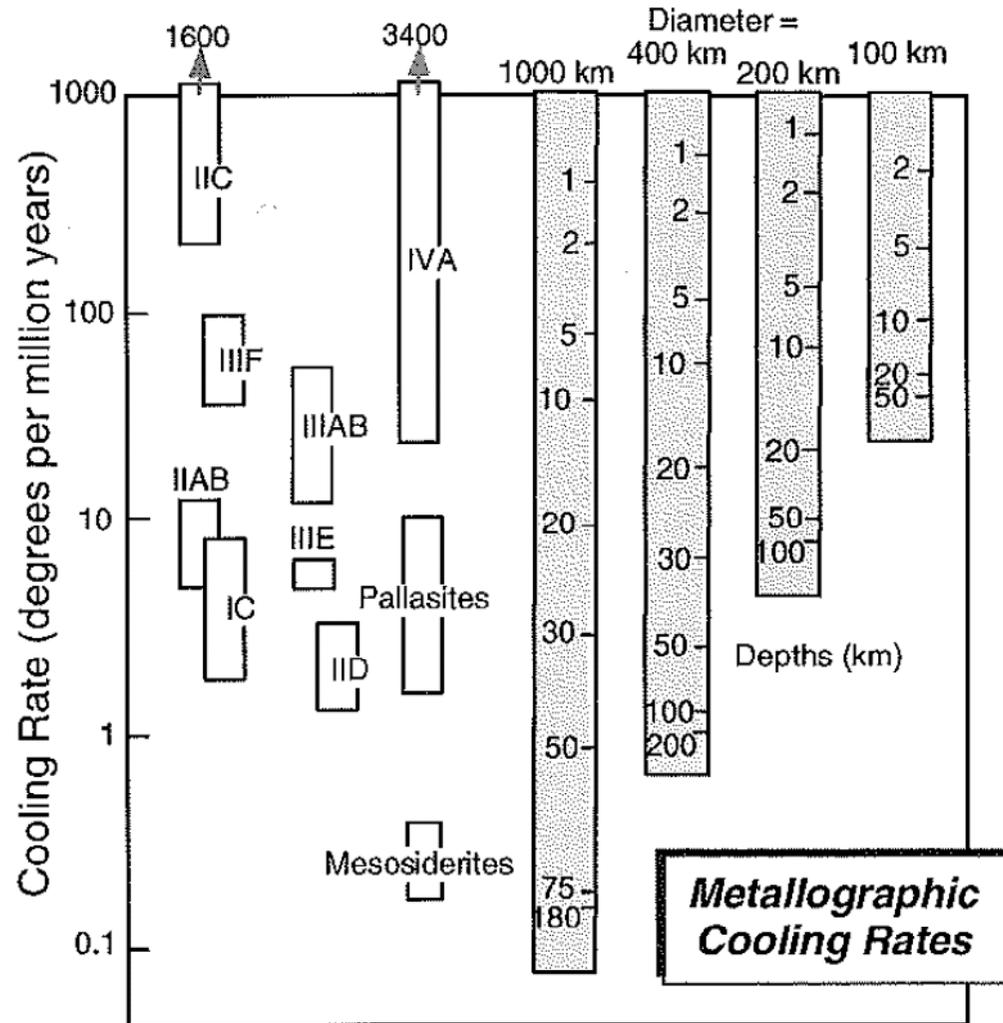
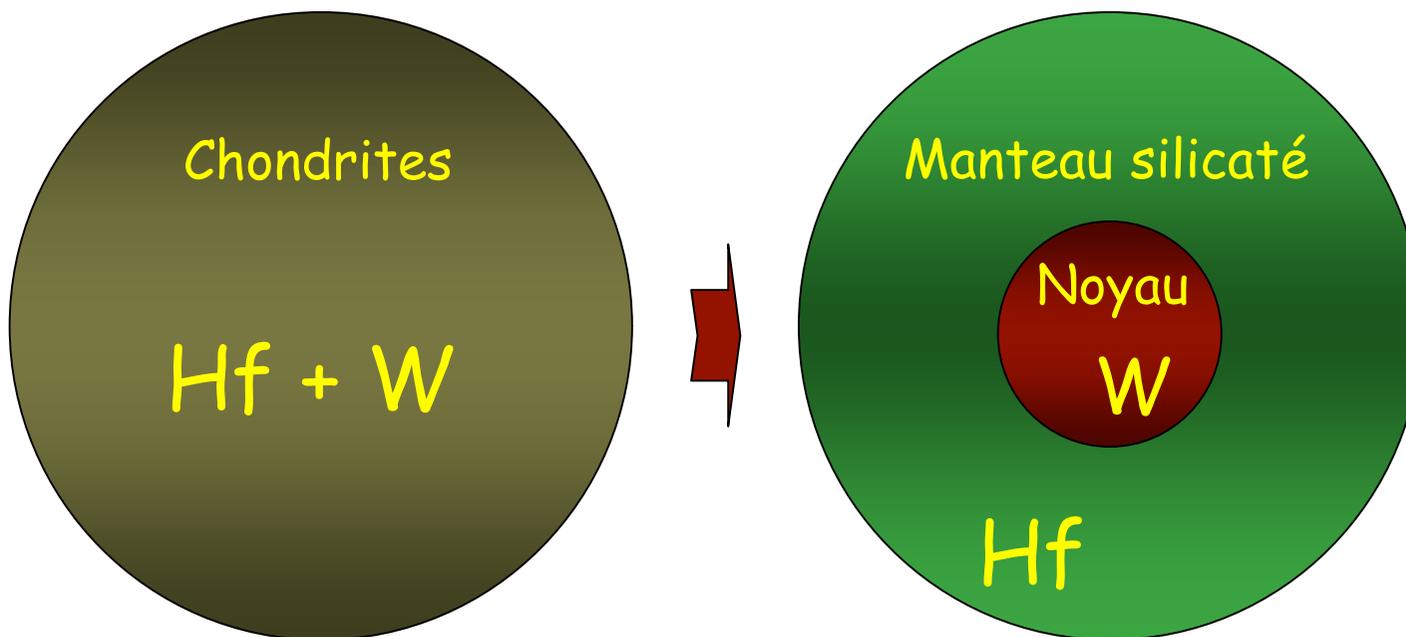


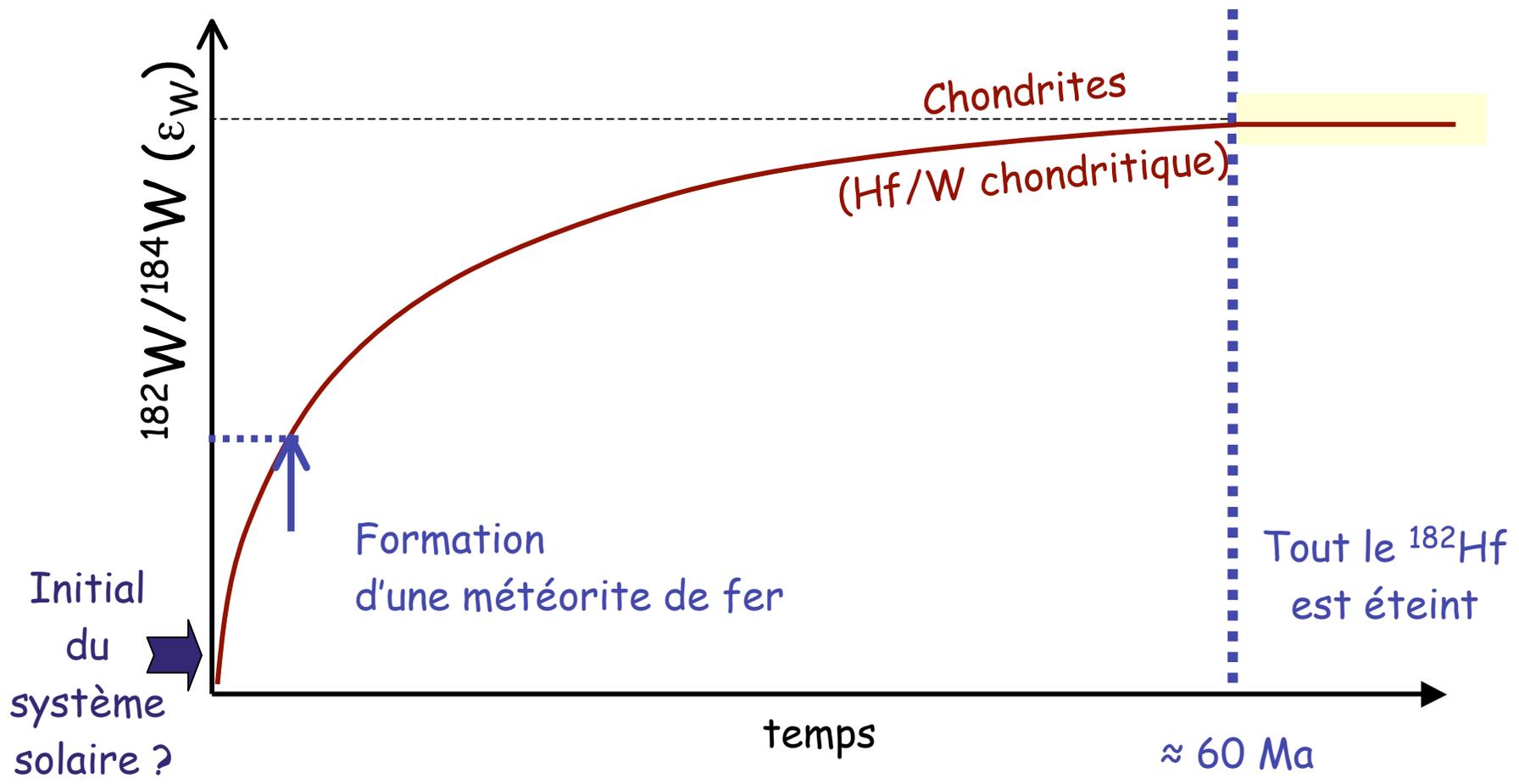
Fig McSween, 1999

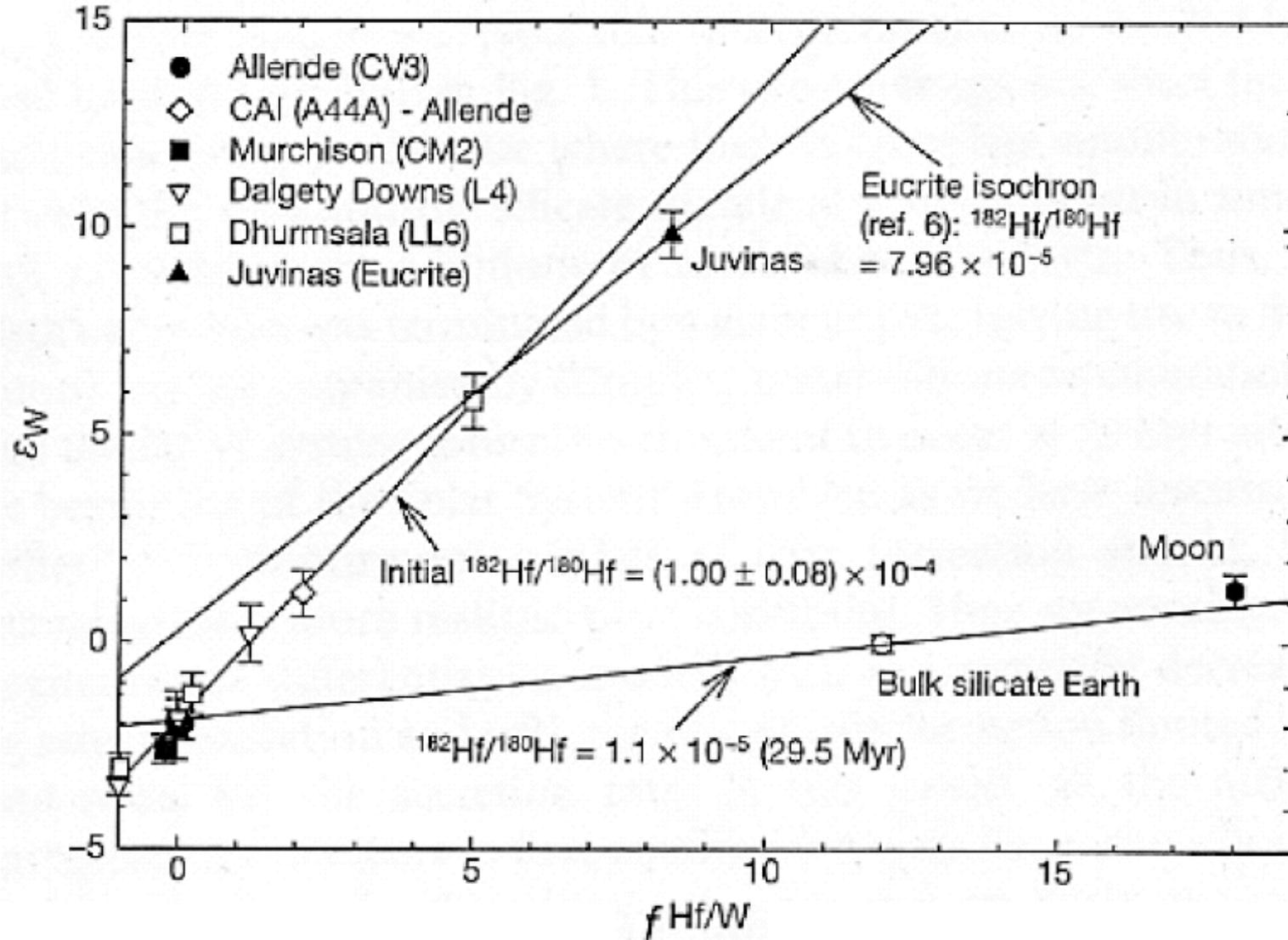


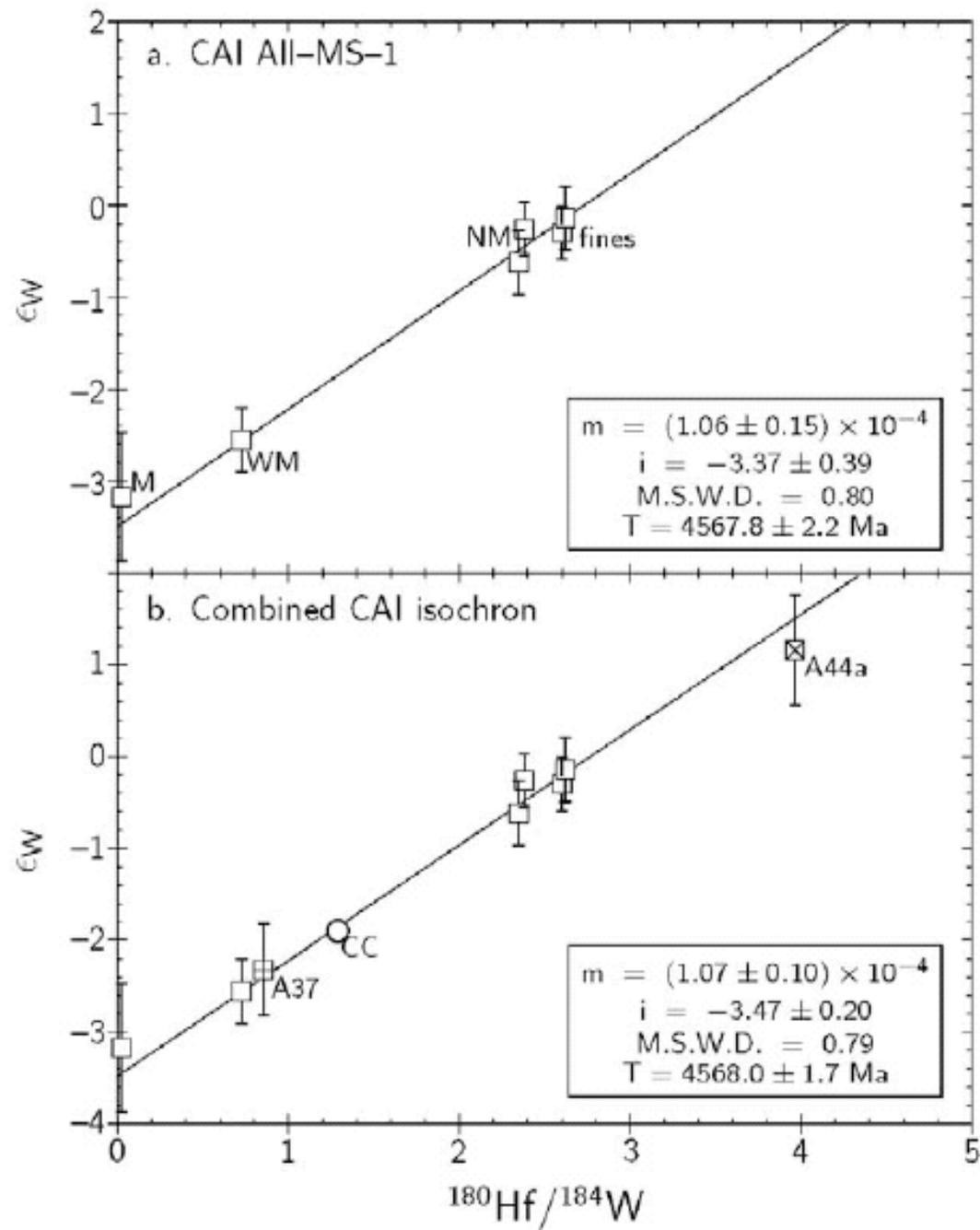
- Quand a eu lieu la différenciation ou la condensation ?

Radioactivité éteinte du  $^{182}\text{Hf}$   
( $^{182}\text{Hf} \rightarrow ^{182}\text{W}$ , demi-vie = 9 Ma)

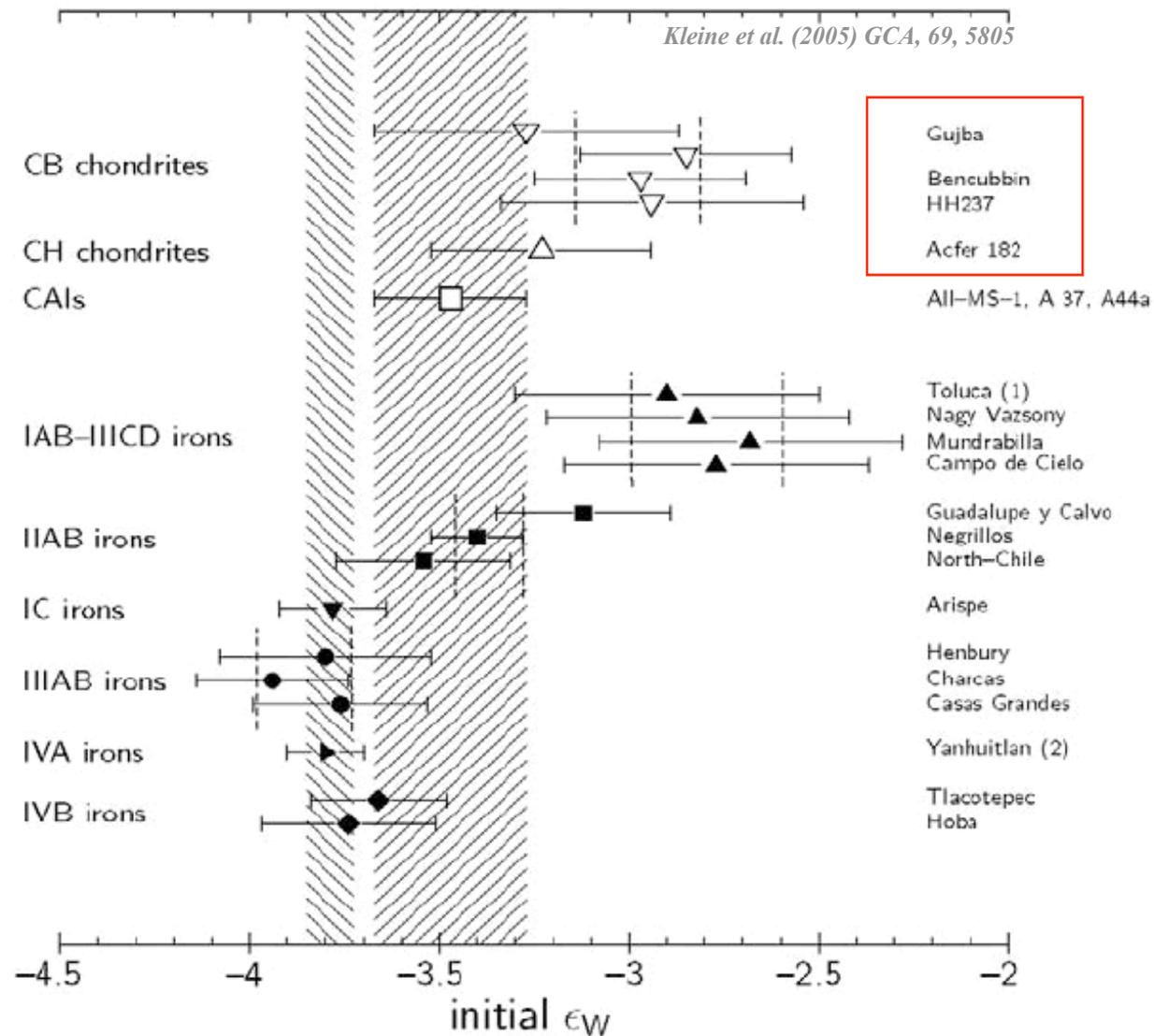


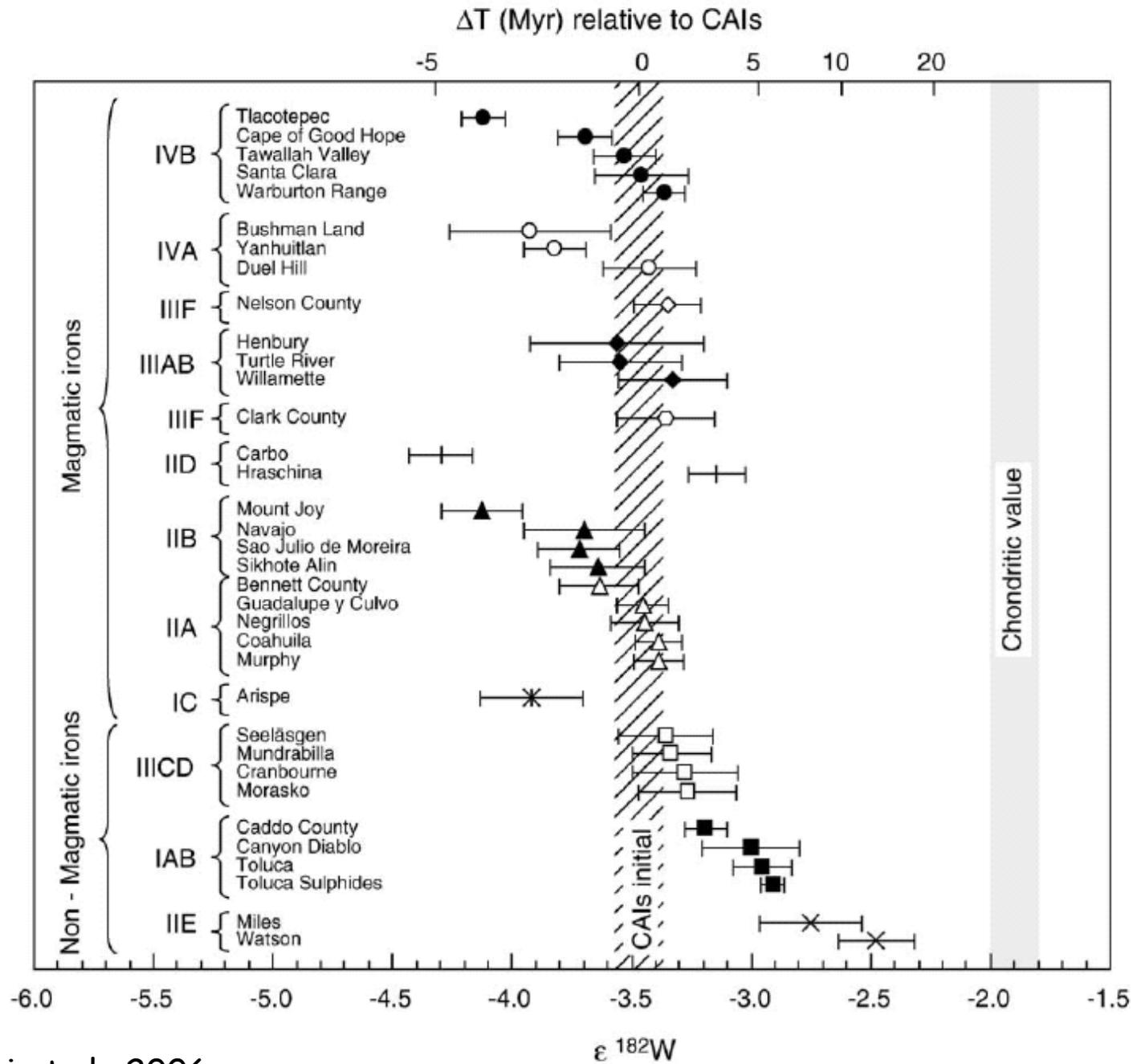




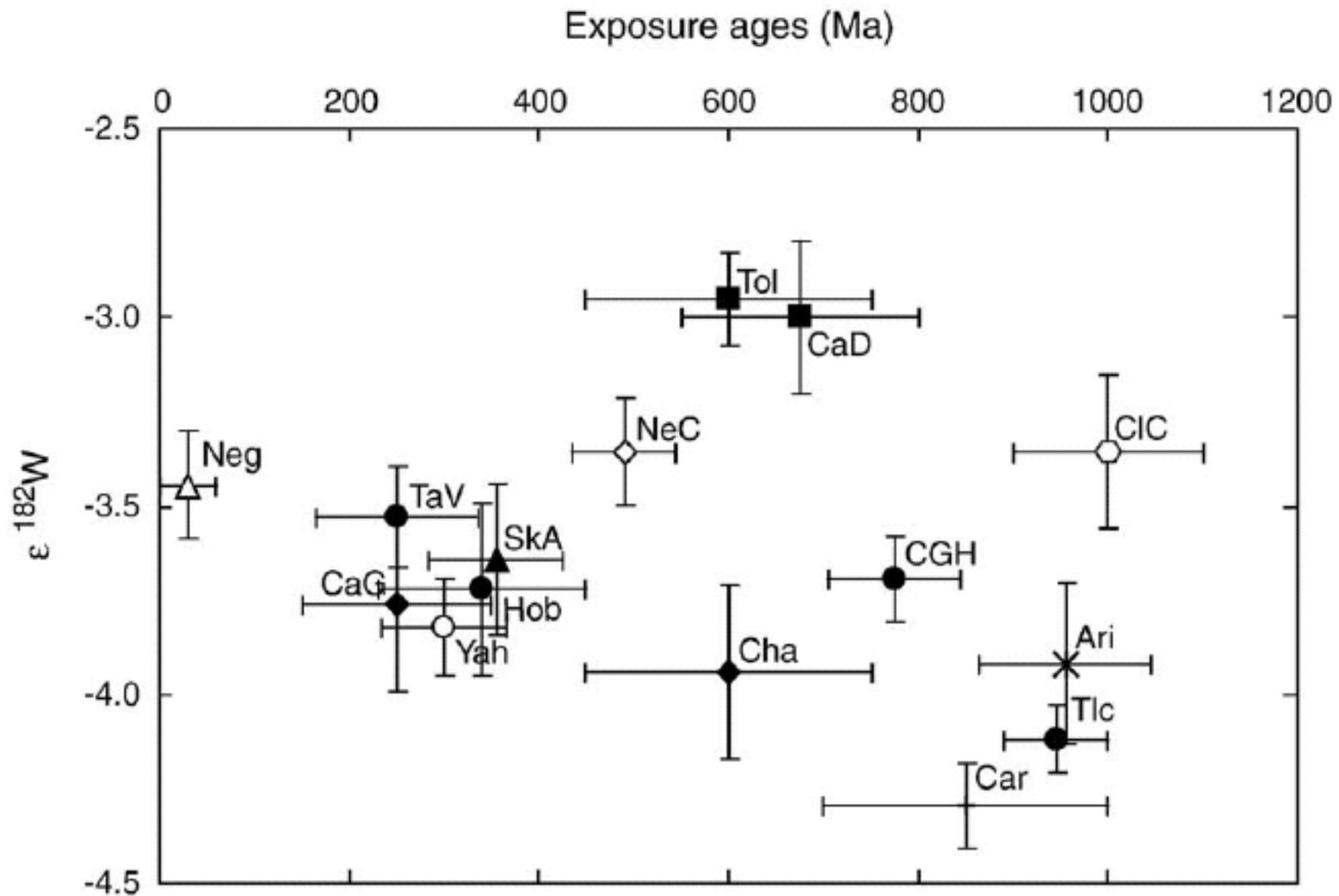


Les météorites de Fer sont aussi vieilles que les CAIs : les corps parents des météorites de fer n'ont aucune raison de ressembler aux chondrites



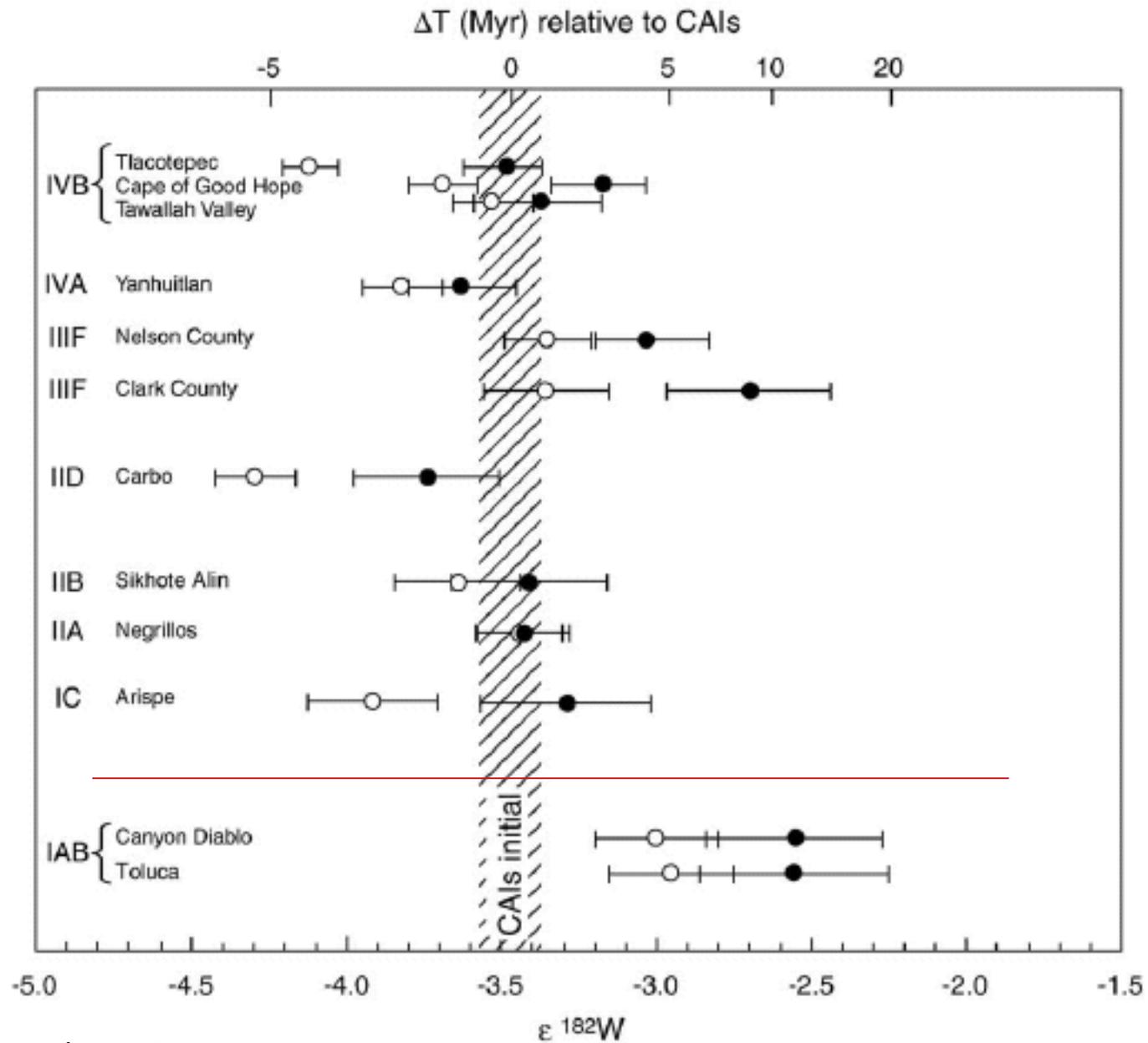


Markovski et al., 2006



Markovski et al., 2006

# Corrigé des effets possibles de spallation

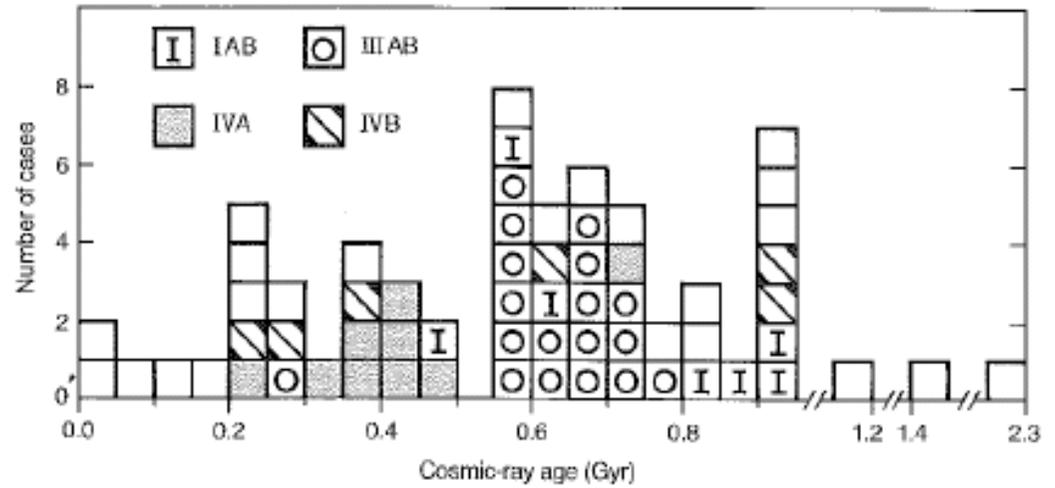
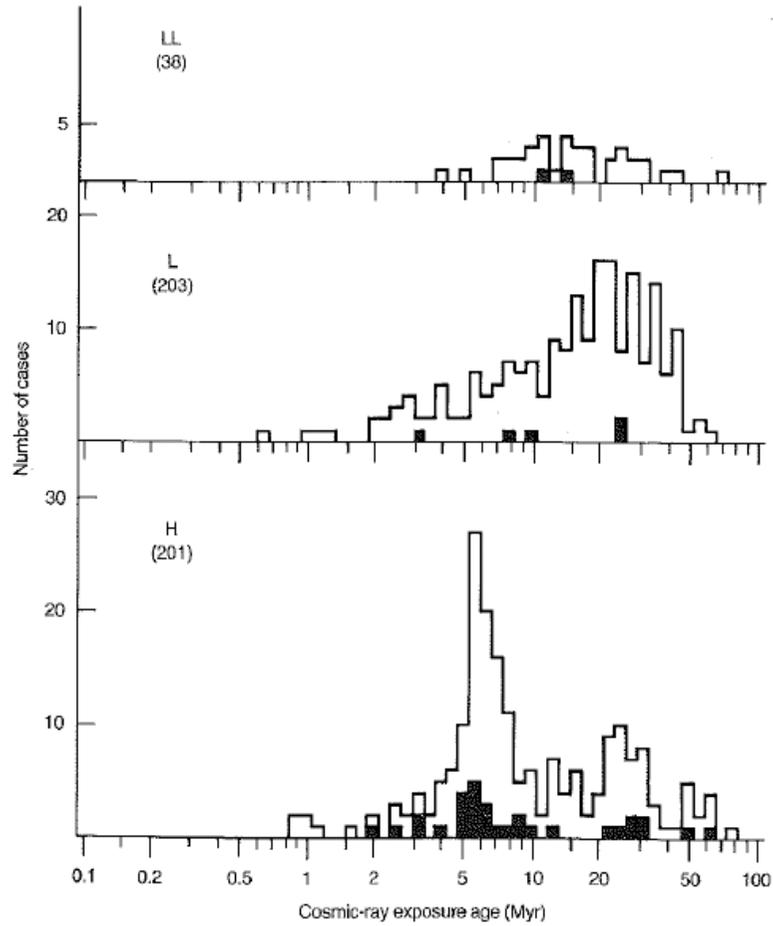


Markovski et al., 2006

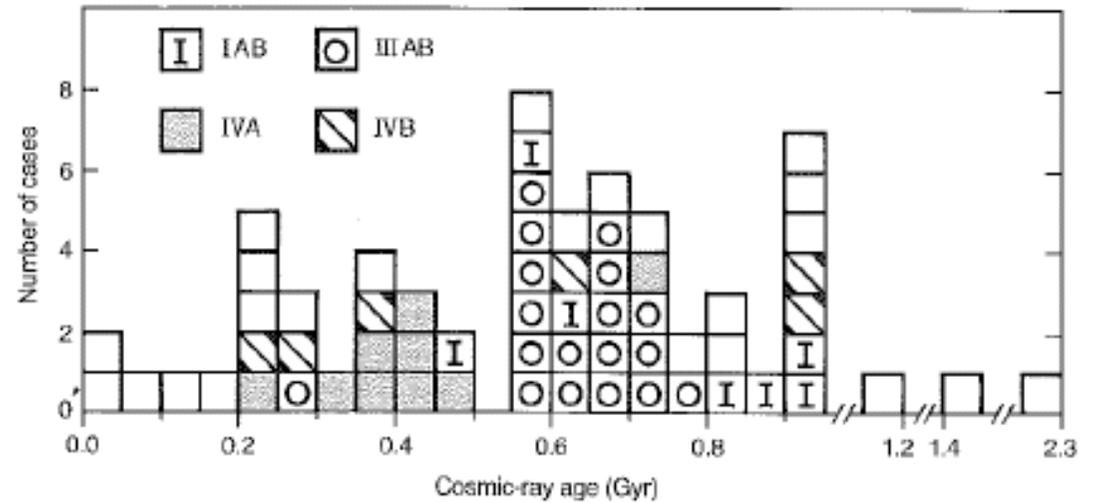
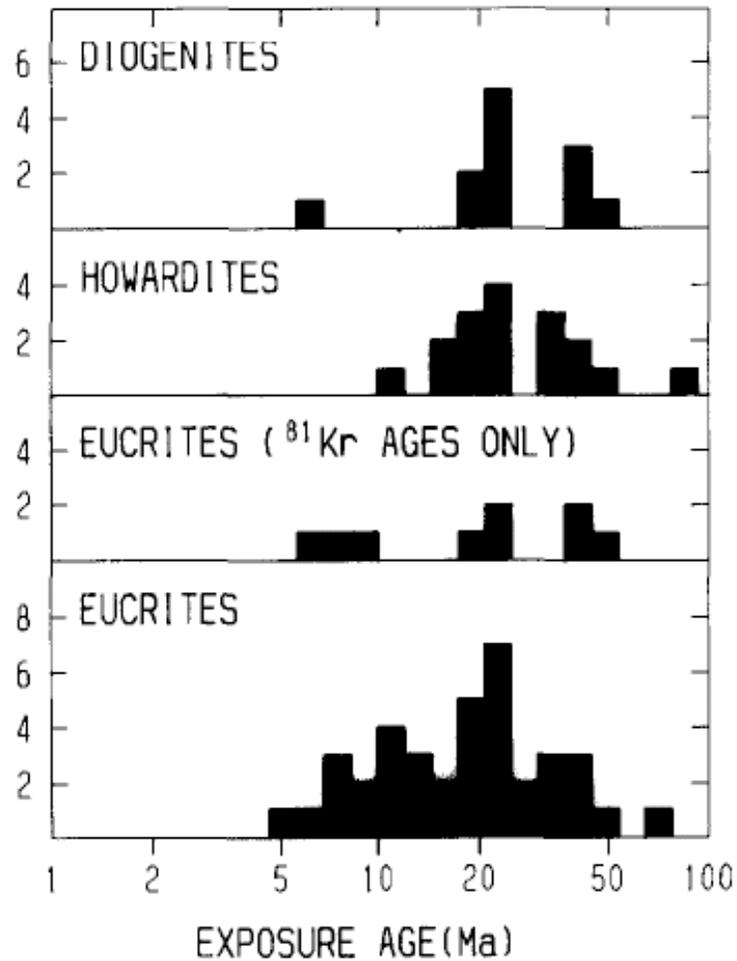


- Qu'est ce qu'on peut bien encore vouloir étudier avec les météorites de fer ?

Les météorites de fer sont des échantillons exceptionnels car elles ont des âges d'exposition très vieux :



La différence d'âge d'exposition avec les HED est une autre indication que leurs corps parents sont différents (malgré les mêmes  $\Delta^{17}\text{O}$ )



- comprendre l'origine des distributions de [Ni] (ou de [Ge] ou [Ga]) et essayer de lier cela à un mode de formation ou de préservation ou autre (si ce sont les fragments d'objets formés très tôt près du Soleil)
- trouver de nouveaux critères pour apparier les météorites de fer entre elles et avec d'autres objets (e.g. mesurer les isotopes de l'O dans le métal)
- mieux exploiter cette observation d'une famille HED, pallasite, mésosidérites
- utiliser le fait qu'elles ont des temps d'exposition très longs
- ...

FIN



*Canyon diablo*