

Doctorat en Sciences  
des aliments

**Isabelle LESTIENNE**  
(Centre IRD, Montpellier)

**Contribution à l'étude de la biodisponibilité  
du fer et du zinc dans le grain de mil et  
conditions d'amélioration dans  
les aliments de complément**



# Plan

---

## Introduction bibliographique

Carences en fer et en zinc  
Biodisponibilité des minéraux  
Les facteurs anti-nutritionnels (FAN)

## Problématique et approches expérimentales

## Principaux résultats

Importance des FAN dans le grain de mil

Répartition

Contribution relative de leur activité anti-nutritionnelle

Effets des procédés technologiques

Trempage, décorticage, broyage, cuisson

Transformation du mil en bouillie fermentée

## Conclusion et perspectives

## Les carences en fer et en zinc

---

**Problèmes de santé publique, notamment dans les pays en développement**

### Causes principales

- Manque de diversité alimentaire
- Régimes pauvres en produits d'origine animale

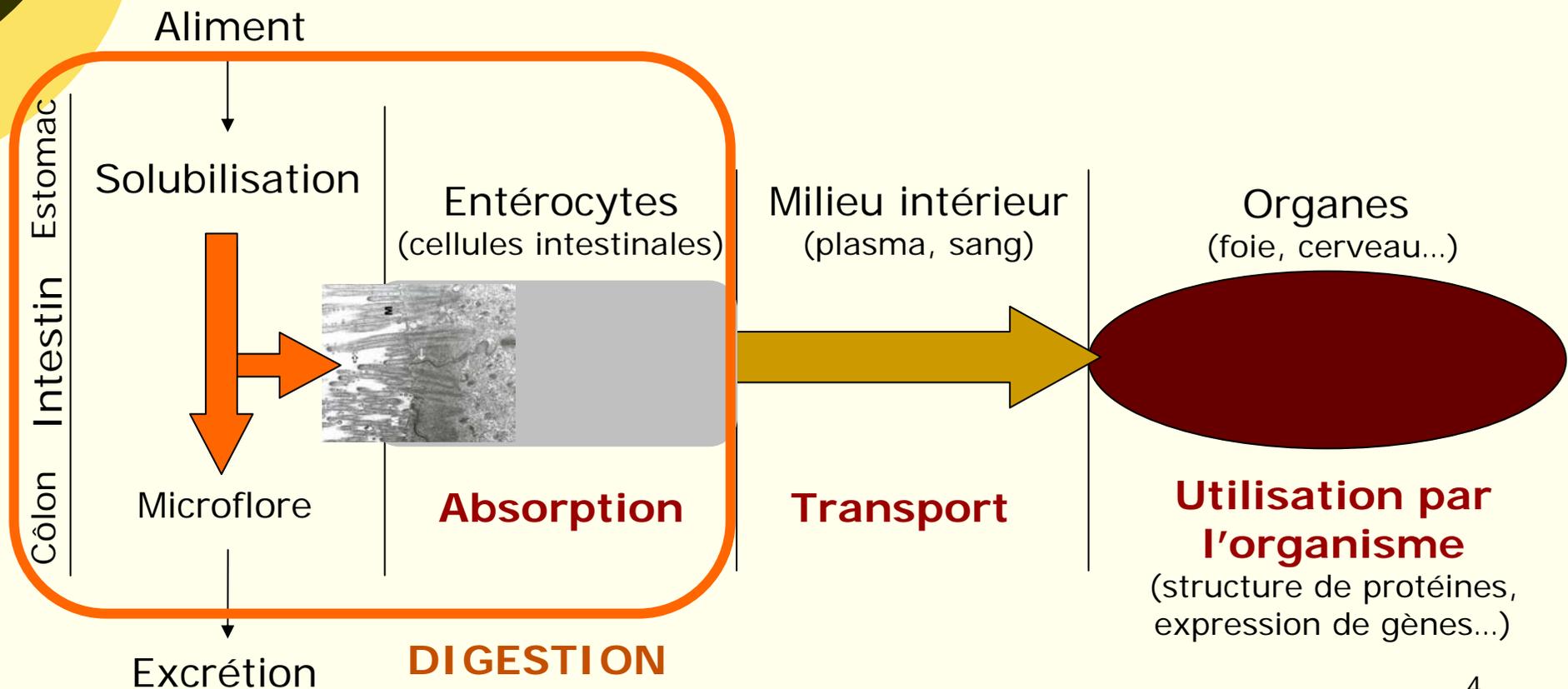
**Problème particulièrement important pour les jeunes enfants (6-24 mois)**

- Besoins nutritionnels élevés
- Aliments de complément non adaptés



## La biodisponibilité des minéraux

Définition : Proportion d'un minéral effectivement utilisé pour assurer les fonctions de l'organisme.



## Méthodes d'évaluation de la biodisponibilité

---

### Méthodes *in vivo* (Solubilisation, absorption, transport, *utilisation*)

Essais cliniques

**Méthodes de référence**, pas utilisables directement chez le jeune enfant, coûteuses et donc d'utilisation limitée

Modèles animaux

### Méthodes *in vitro* ou *ex vivo* (Solubilisation, *absorption*)

Digestions *in vitro* + centrifugation ou dialyse

Digestions *in vitro* + passage sur cellules Caco-2

### Estimations indirectes

Rapports molaires phytates / minéraux

Phytate / Fe > 14

signes de carence en fer chez le rat

Phytate / Fe > 0,5-1

faible biodisponibilité du fer

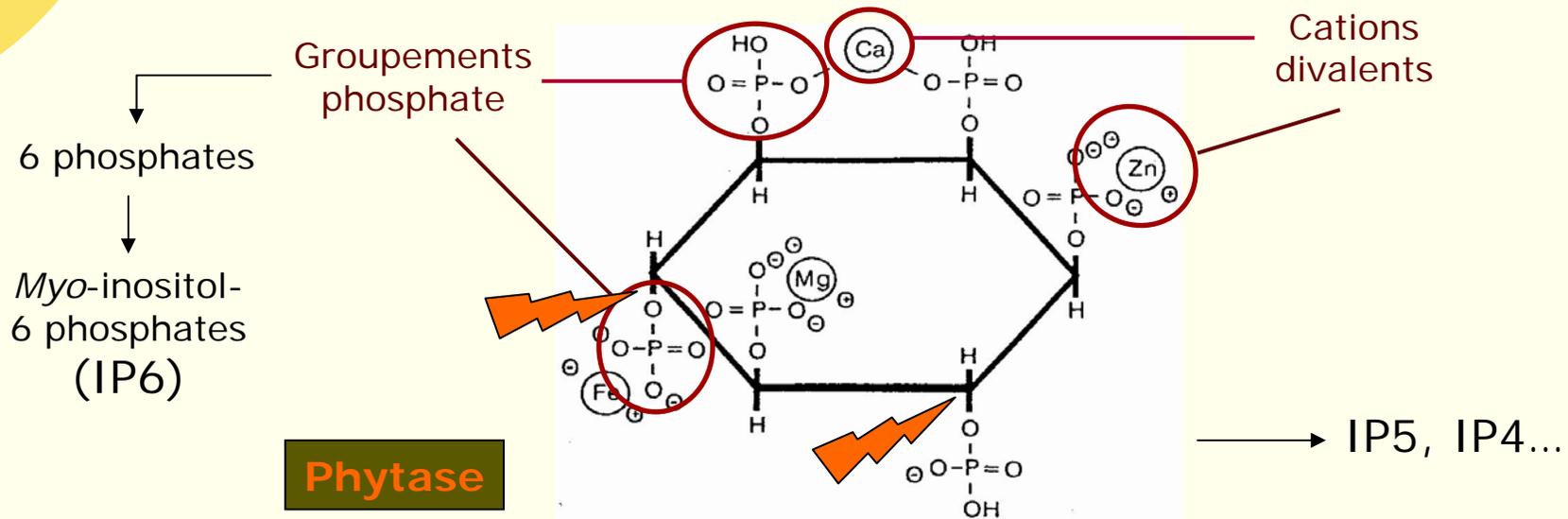
Phytate / Zn > 15

signes de carence en zinc chez le rat

## Les facteurs anti-nutritionnels

- **Les phytates**

Principale source de stockage du phosphore chez les plantes.



Structure d'un phytate  
(sel d'acide phytique)

## Les facteurs anti-nutritionnels

---

### Interactions phytates / minéraux

- D'après la littérature, les phytates sont les principaux facteurs diminuant la biodisponibilité du fer et du zinc.
- Ces interactions dépendent de la matrice alimentaire.

**Mais, certains points restent à clarifier, par exemple :**

Existe-t-il une valeur seuil de teneur en phytates à partir de laquelle la biodisponibilité des minéraux augmente ou la relation est-elle dose-dépendante ?

## Les facteurs anti-nutritionnels

- Les tanins condensés

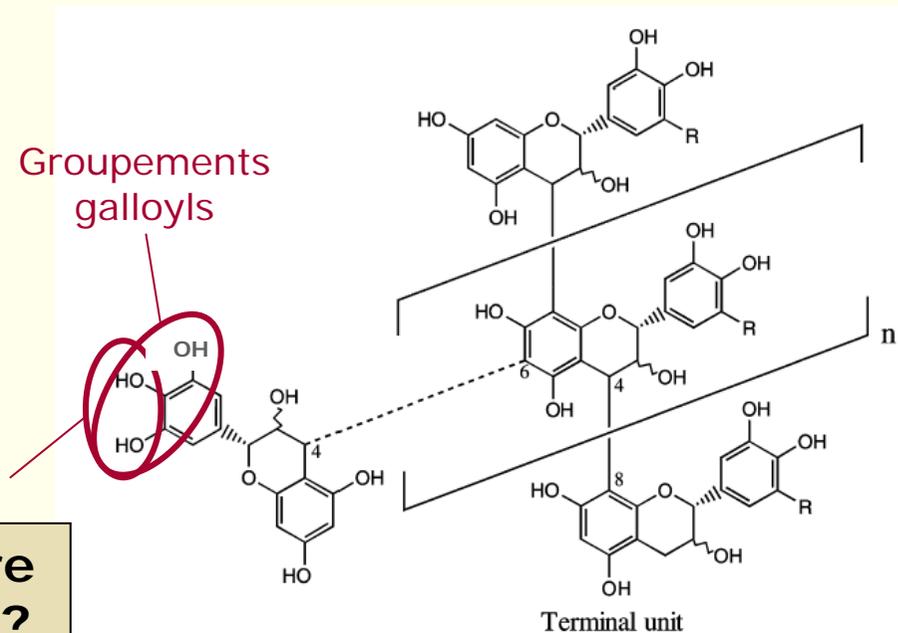
Composés phénoliques abondants dans les téguments de certaines graines de céréales et de légumineuses.

### Inhibition de l'absorption du fer

- Formation de complexes insolubles
- Relation dose-dépendante entre la teneur en tanins et l'absorption du fer.

Groupements  
catéchols

Existe-t-il des interactions entre les tanins condensés et le zinc ?



Structure d'un tanin condensé

## Les facteurs anti-nutritionnels

- **Les fibres**

Ensemble complexe de  
composés polysaccharidiques  
ou non, solubles ou non,  
chargés ou non...



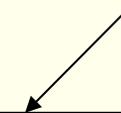
**Interactions ioniques  
ou stériques avec les  
minéraux**



Dans les végétaux, fibres  
souvent associées à d'autres  
composés, dont les tanins et  
les phytates



**Effets propres des fibres  
sur les minéraux difficiles  
à évaluer**



Existence d'interactions fibres-Fe ou fibres-Zn ?  
Nature des fibres éventuellement responsables  
de la formation de complexes insolubles ?

# Plan

---

## Introduction bibliographique

- Carences en fer et en zinc
- Biodisponibilité des minéraux
- Les facteurs anti-nutritionnels (FAN)

## Problématique et approches expérimentales

### Principaux résultats

- Importance des FAN dans le grain de mil

  - Répartition

  - Contribution relative de leur activité anti-nutritionnelle

- Effets des procédés technologiques

  - Trempage, décorticage, broyage, cuisson

  - Transformation du mil en bouillie fermentée

## Conclusion et perspectives

Introduction bibliographique	<b>Problématique et approches expérimentales</b>	Principaux résultats		Conclusion et perspectives
		Facteurs anti-nutritionnels	Effets des procédés	

## Problématique

---

**La biodisponibilité du fer et du zinc dans le grain de mil et conditions d'amélioration dans les aliments de complément**



Quelle est la contribution relative des différents FAN à la faible biodisponibilité du fer et du zinc dans le grain de mil ?

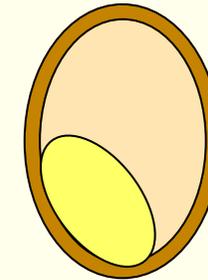


Quelles sont les voies envisageables pour l'amélioration des aliments de complément ?

## Approches expérimentales (1/2)

### Fractionnement (décorticage abrasif)

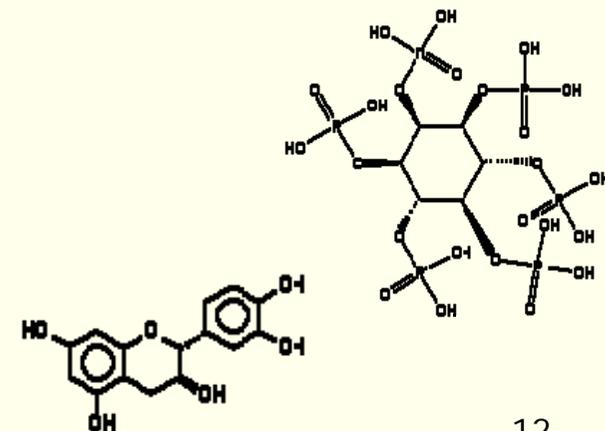
- Localiser les composés, et notamment les FAN et les minéraux
- Elaborer des « aliments modèles »



Espèce : *Pennisetum glaucum*  
Variété : Gampela (Burkina Faso)

### Approche enzymatique (action de phytases et/ou xylanases)

- Evaluer l'effet de la dégradation des phytates sur la digestibilité *in vitro* du fer et du zinc dans les différentes fractions du grain de mil
- Identifier la nature des complexes présents dans ces fractions

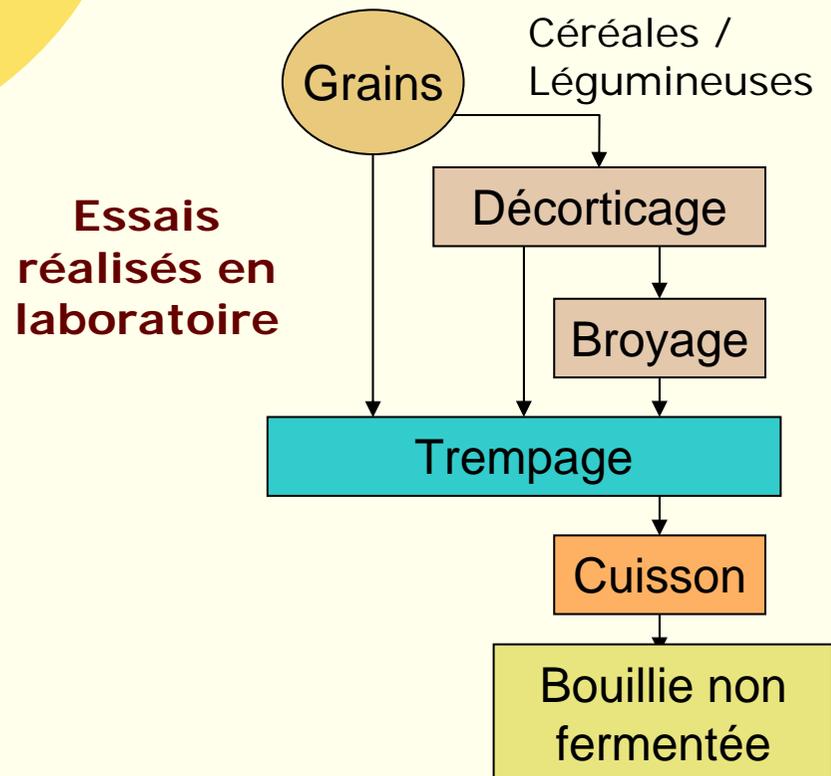


Introduction bibliographique	Problématique et approches expérimentales	Principaux résultats		Conclusion et perspectives
		Facteurs anti-nutritionnels	Effets des procédés	

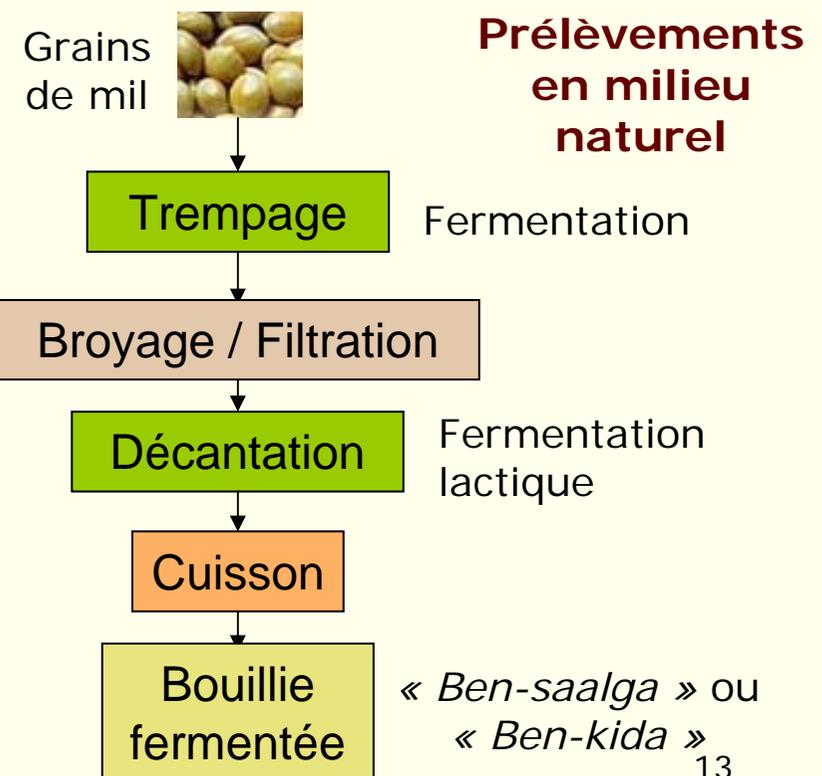
## Approches expérimentales (2/2)

- Mise en œuvre de procédés technologiques pour en évaluer les effets sur les teneurs en FAN et la biodisponibilité du fer et du zinc

### Trempeage, décortiquage, broyage, cuisson



### Transformation du mil en bouillie fermentée



## Indicateurs pris en compte

---

### Teneurs en facteurs anti-nutritionnels

- Phytates (IP6)
- Tanins (catéchols et galloyls)
- Fibres ADF (cellulose, lignine) et NDF (cellulose, lignine, hémicelluloses)

### Indicateurs de la biodisponibilité du fer et du zinc

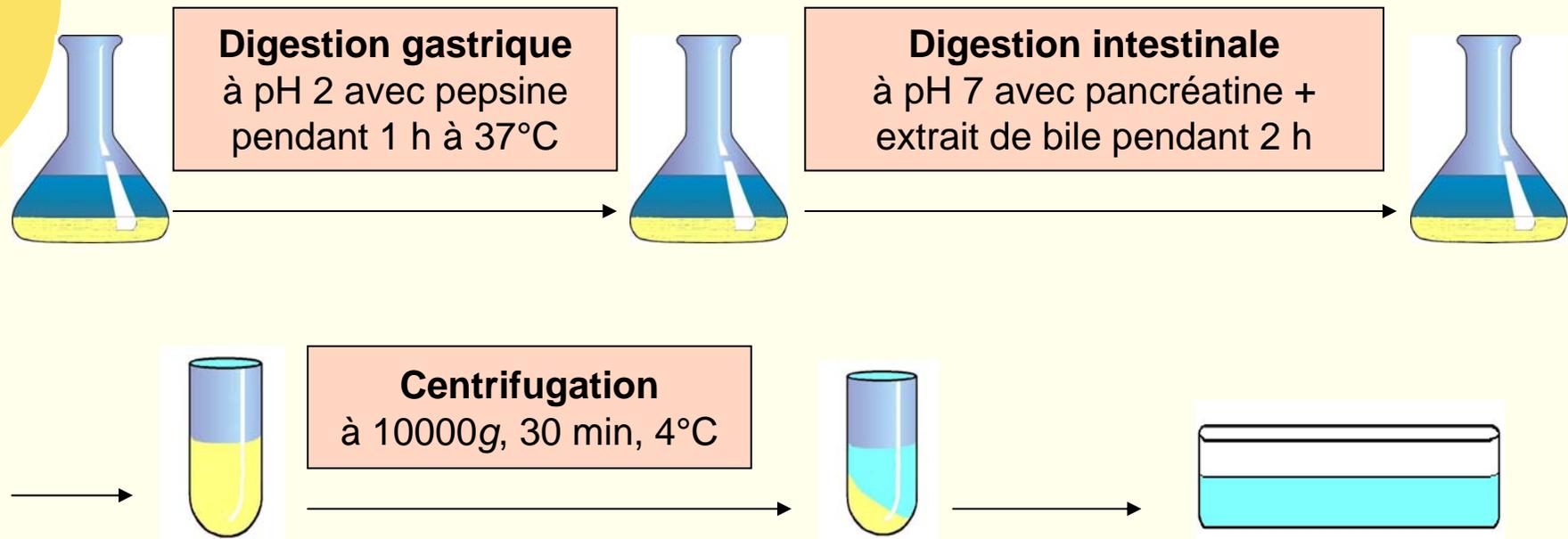
- Rapports molaires Phy/Fe et Phy/Zn
  - Digestibilité *in vitro* du fer et du zinc
- } *Teneurs en fer et en zinc totales*

### Autres indicateurs

- Activité phytasique
- Teneurs en macronutriments (amidon, protéines, lipides)

Introduction bibliographique	Problématique et approches expérimentales	Principaux résultats		Conclusion et perspectives
		Facteurs anti-nutritionnels	Effets des procédés	

## Mesure des digestibilités *in vitro* (DIV) du fer et du zinc



Références : Lönnerdal *et al.* (1993), Glahn *et al.* (2000), Bermejo *et al.* (2002), Wolfgor *et al.* (2002)

**Teneurs en Fe et Zn solubilisés par digestion *in vitro***

# Plan

---

## Introduction bibliographique

Carences en fer et en zinc  
Biodisponibilité des minéraux  
Les facteurs anti-nutritionnels (FAN)

## Problématique et approches expérimentales

## Principaux résultats

### Importance des FAN dans le grain de mil

#### Répartition

Contribution relative de leur activité anti-nutritionnelle

#### Effets des procédés technologiques

Trempage, décorticage, broyage, cuisson  
Transformation du mil en bouillie fermentée

## Conclusion et perspectives

# Répartition des composés dans le grain de mil

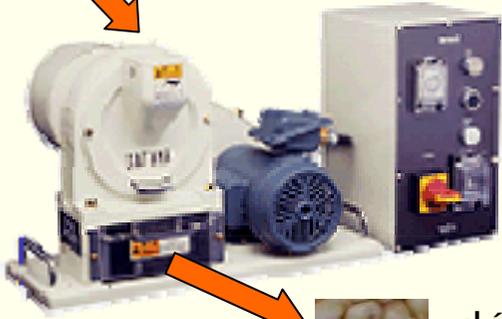
## Méthodologie

### Décortiquage abrasif progressif

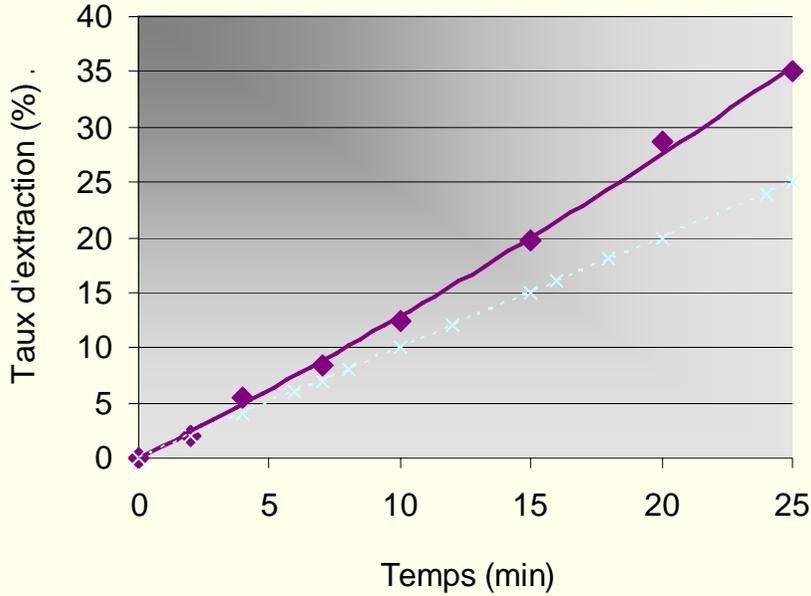
Grains de mil humidifiés à 15% d'eau



Temps de séjour (0-25min)

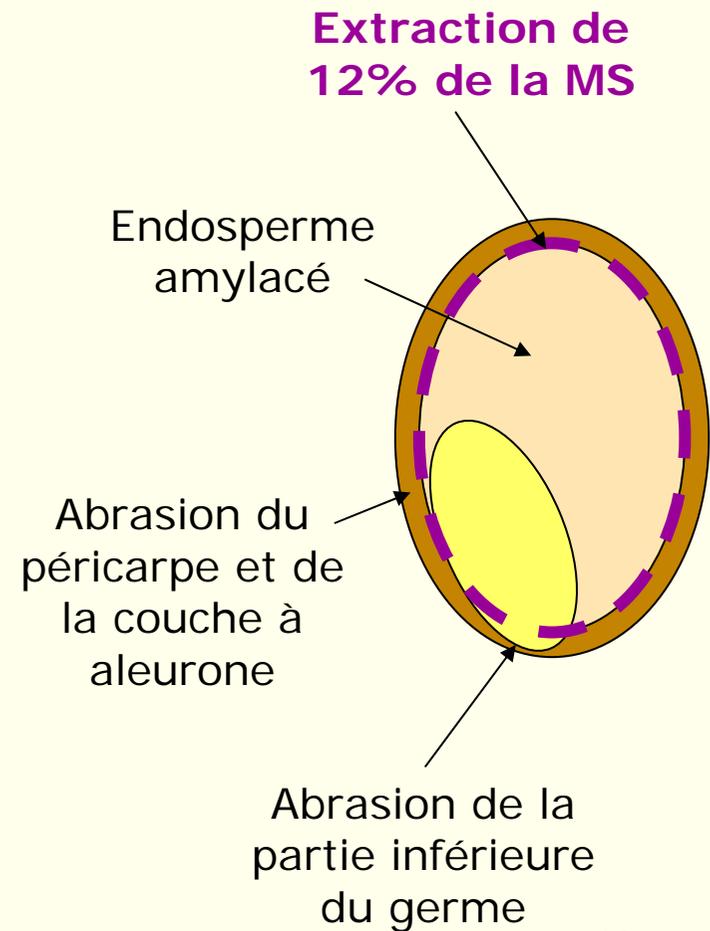
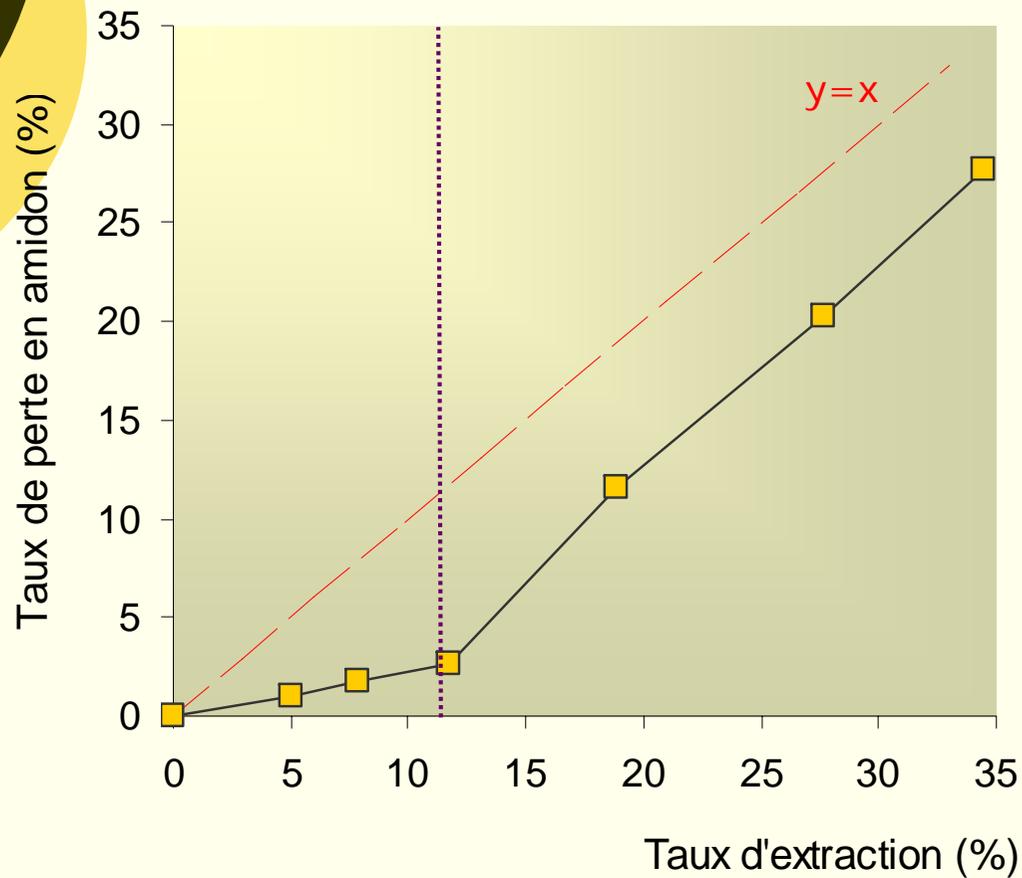


Grains de mil décortiqués de 0 à 35% d'extraction

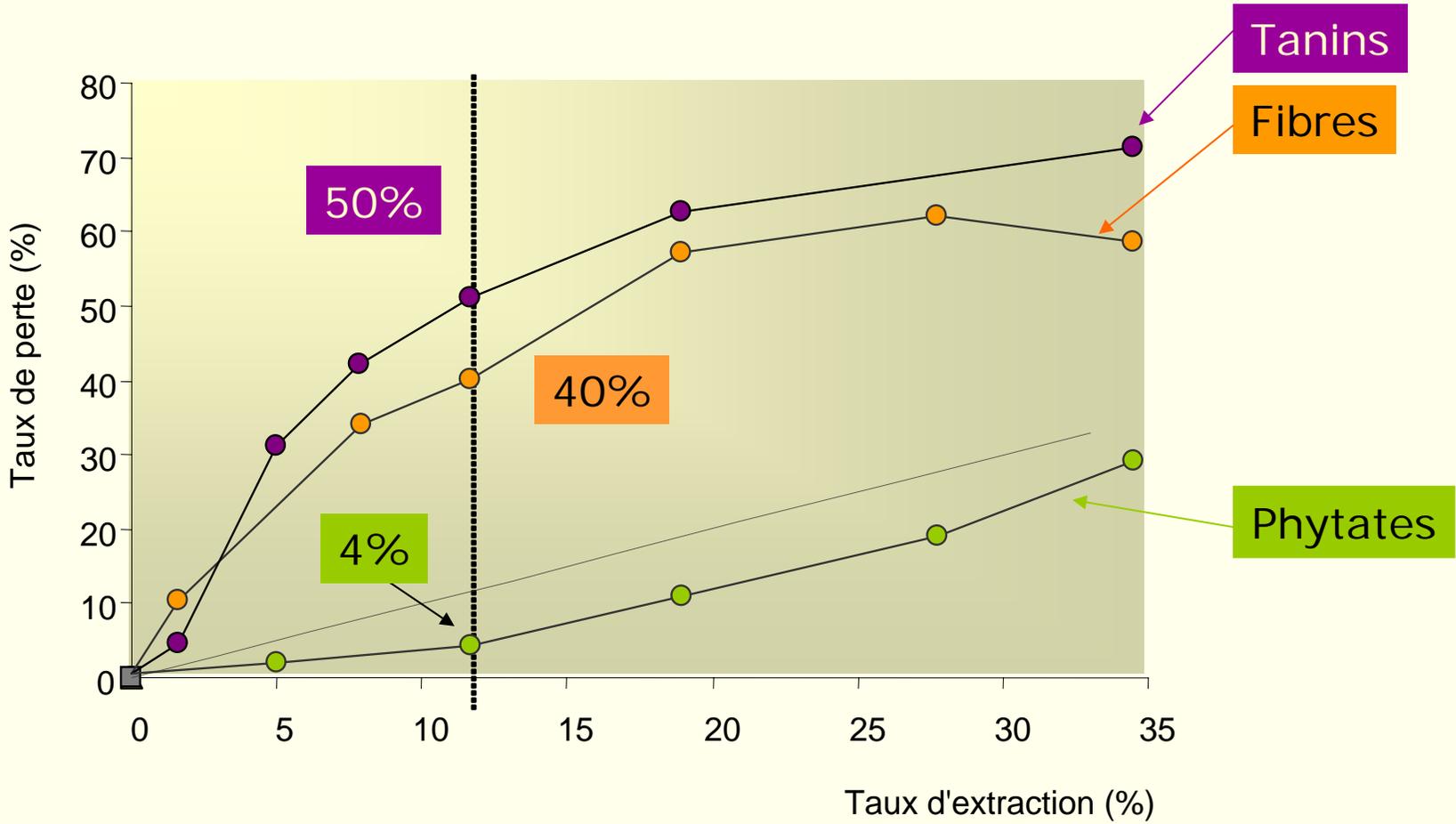


- Détermination des taux de perte en :**
- Amidon
  - Protéines
  - Lipides
  - Fer
  - Zinc
  - Fibres ADF
  - Tannins
  - Phytates
  - Activité phytasique

## Evolution du taux de perte en amidon

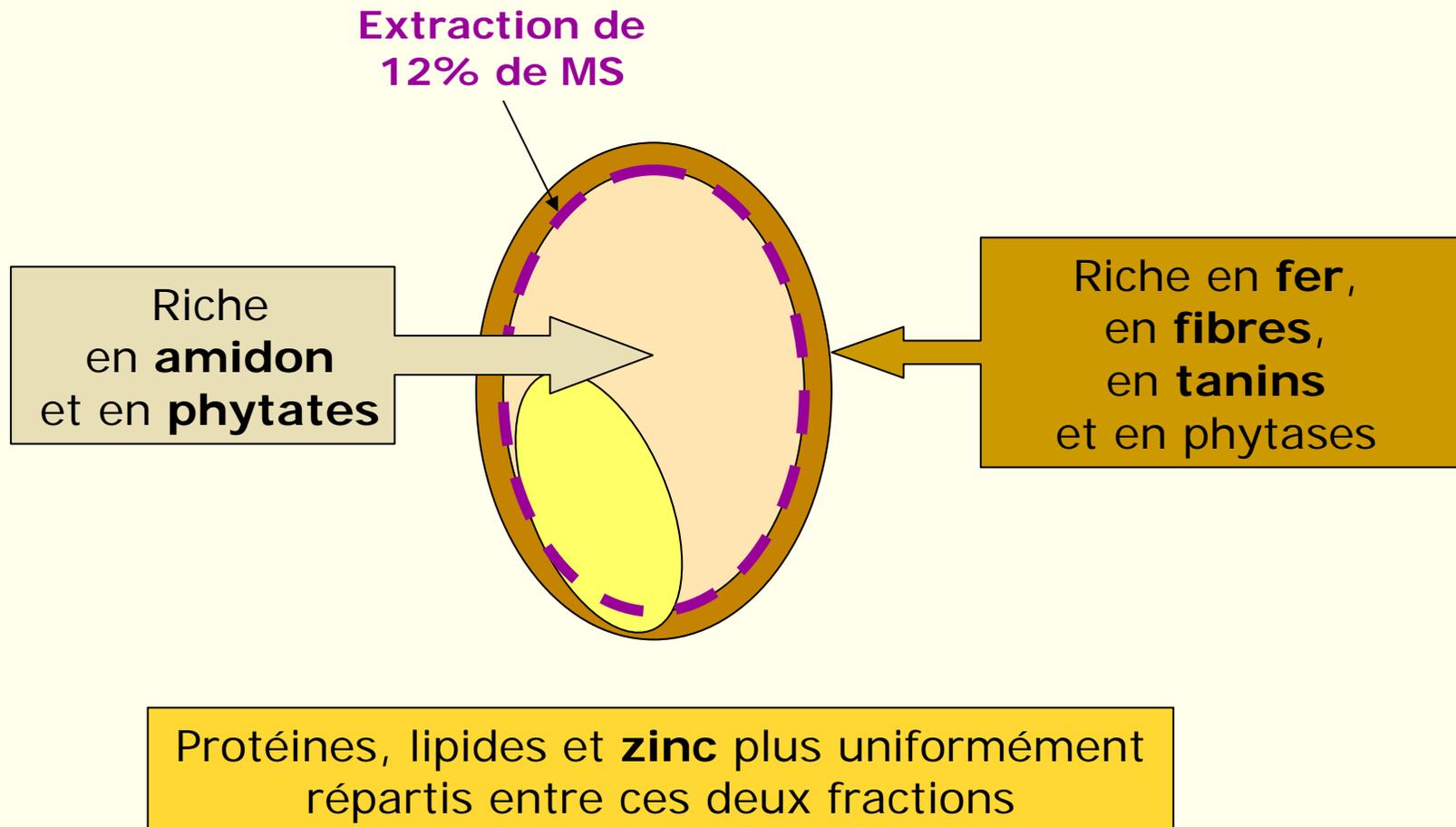


# Répartition des FAN



Introduction bibliographique	Problématique et approches expérimentales	Principaux résultats		Conclusion et perspectives
		Répartition des FAN	Effets des procédés	

## Répartition des composés dans le grain de mil



# Plan

---

## Introduction bibliographique

- Carences en fer et en zinc
- Biodisponibilité des minéraux
- Les facteurs anti-nutritionnels (FAN)

## Problématique et approches expérimentales

## Principaux résultats

### Importance des FAN dans le grain de mil

- Répartition

- Contribution relative de leur activité anti-nutritionnelle

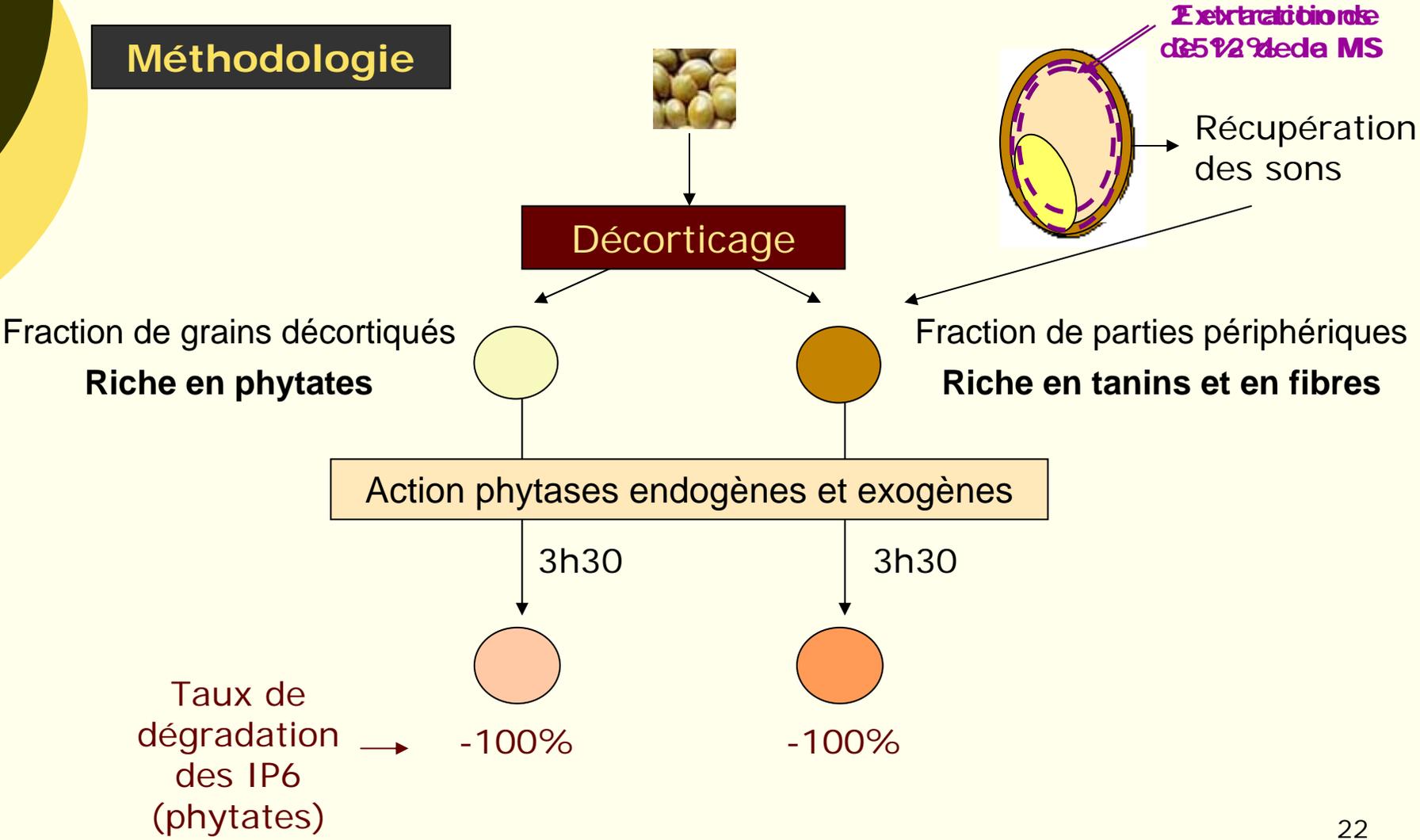
### Effets des procédés technologiques

- Trempage, décorticage, broyage, cuisson
- Transformation du mil en bouillie fermentée

## Conclusion et perspectives

# Influence de la dégradation des phytates et des teneurs en tanins et en fibres

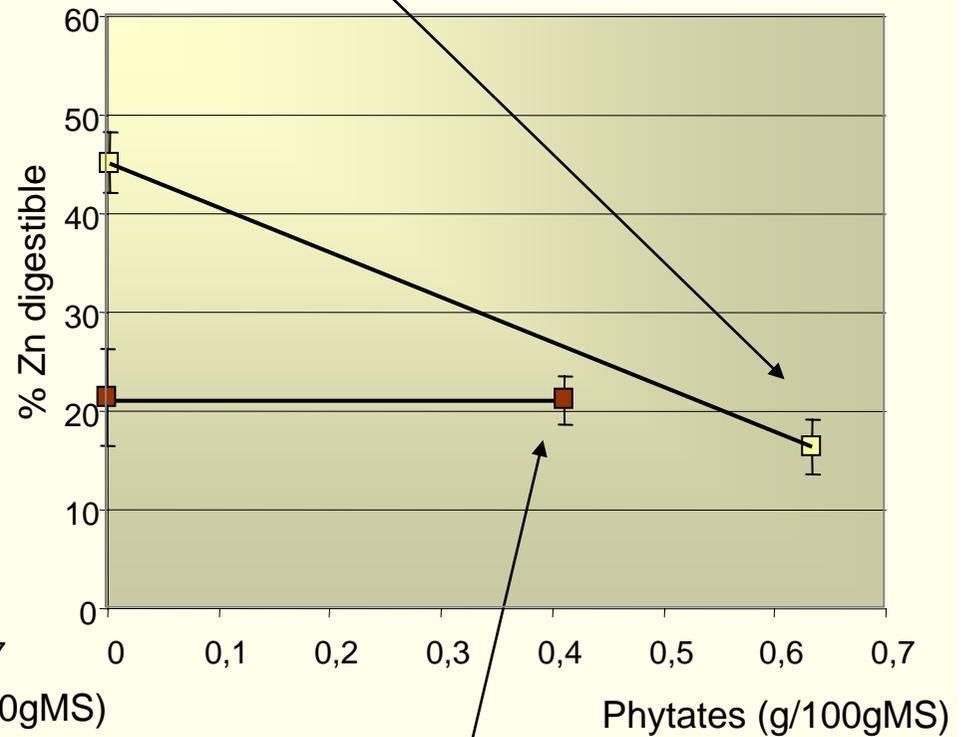
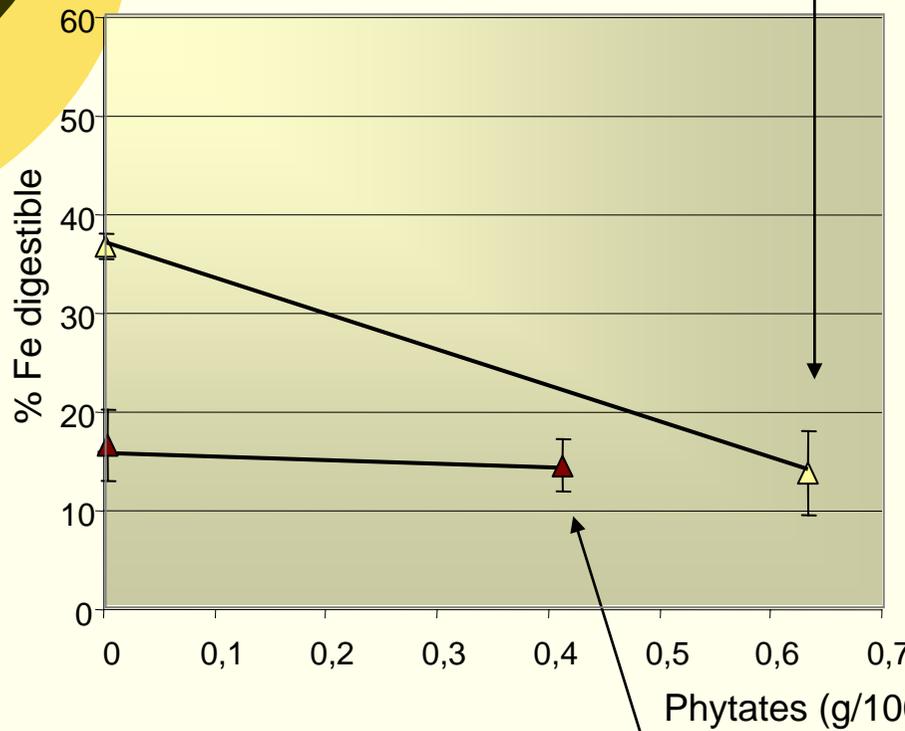
## Méthodologie



Digestibilité *in vitro* du fer

Digestibilité *in vitro* du zinc

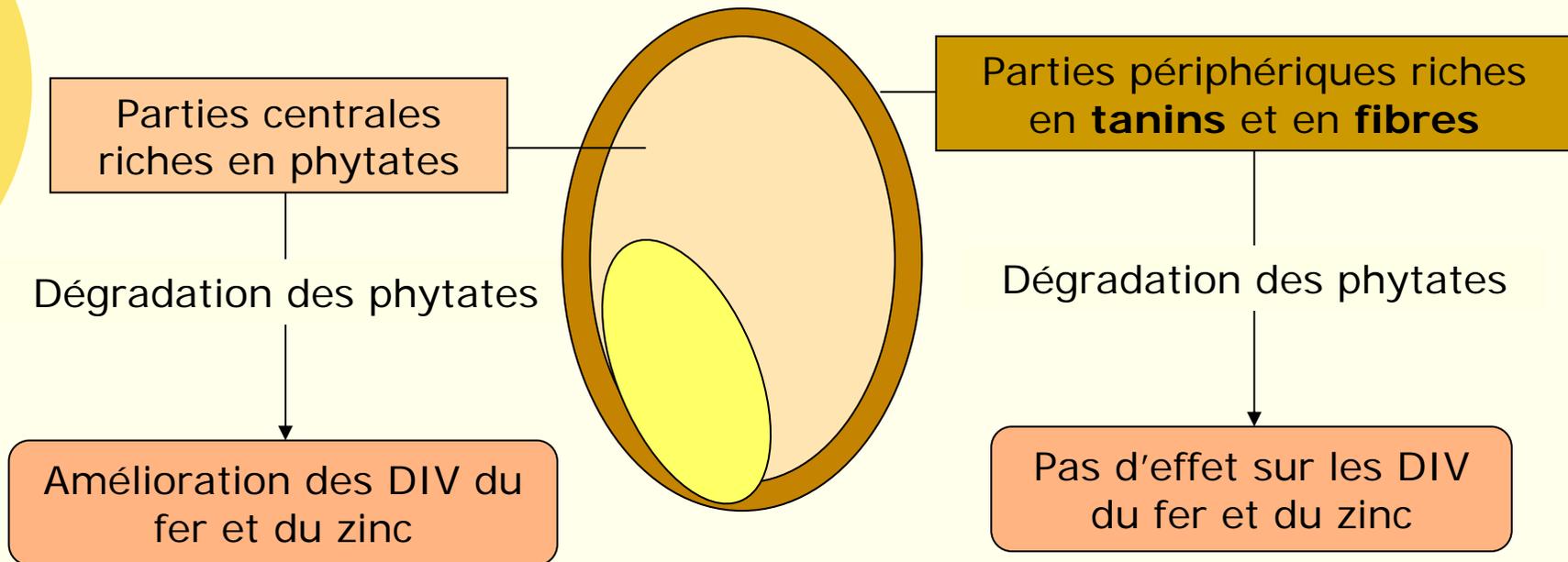
Fraction de grains décortiqués  
(faibles teneurs en tanins et en fibres)



Fraction de parties périphériques  
(fortes teneurs en tanins et en fibres)

Introduction bibliographique	Problématique et approches expérimentales	Principaux résultats		Conclusion et perspectives
		Contribution des FAN	Effets des procédés	

## En résumé...



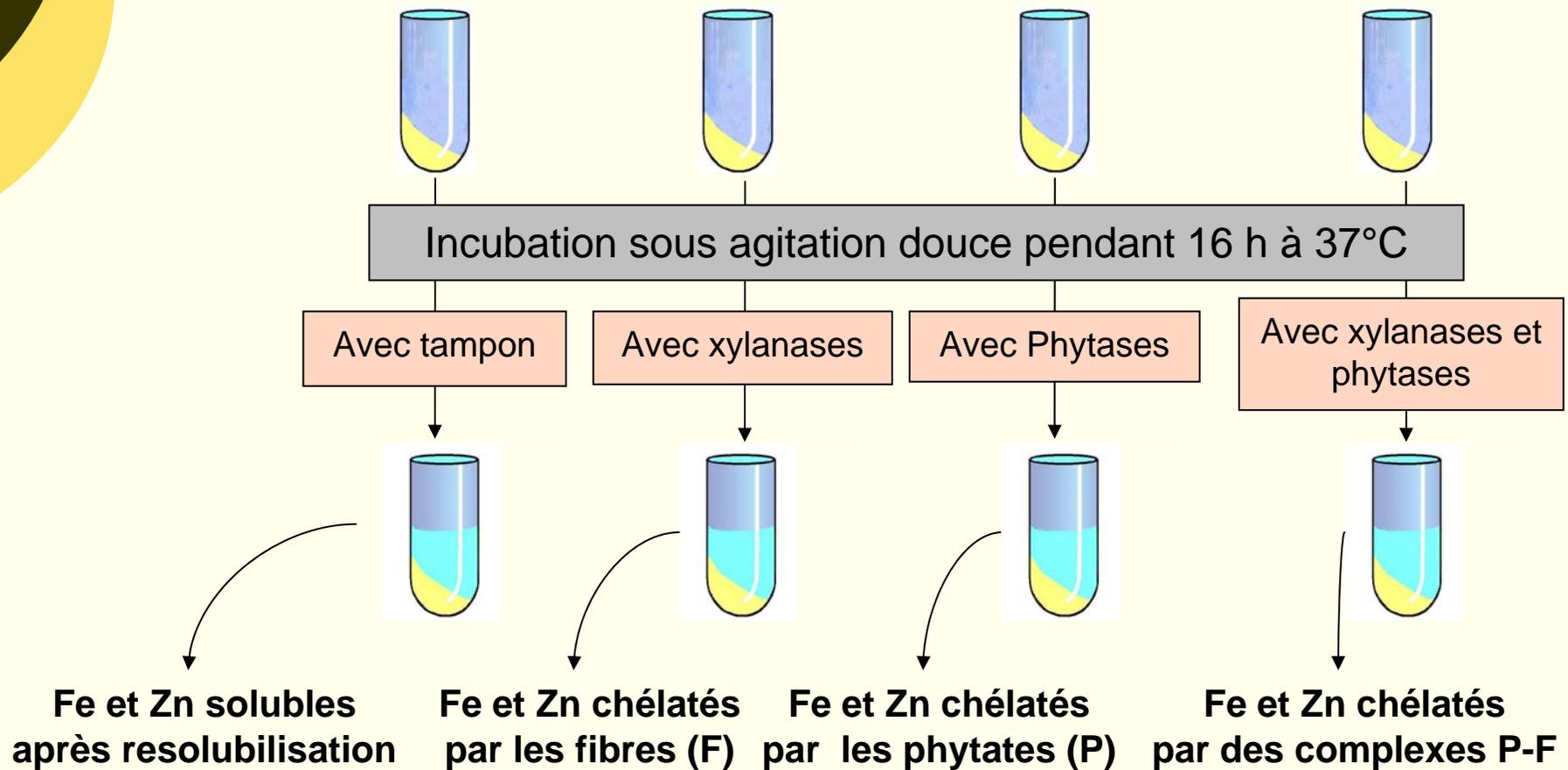
- ➡ Pourquoi la dégradation des phytates n'a-t-elle apparemment pas d'effet sur les DIV du fer et du zinc dans les parties périphériques ?
- ➡ Quelle est la nature des complexes réduisant les DIV du fer et du zinc dans le grain de mil ?

Introduction bibliographique	Problématique et approches expérimentales	Principaux résultats		Conclusion et perspectives
		Contribution des FAN	Effets des procédés	

## Essais d'identification des complexes

### Méthodologie

Résidus insolubles après digestion *in vitro*



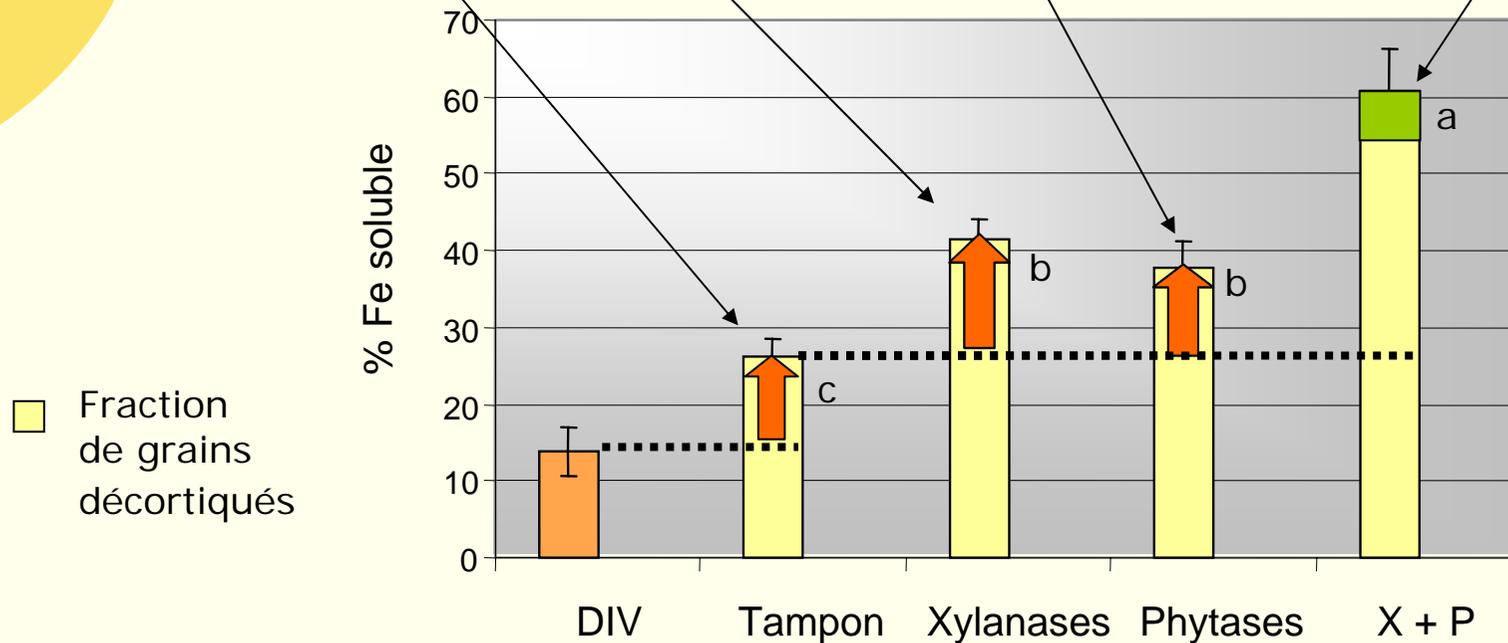
## Solubilité du fer

Fer solubilisé uniquement par l'incubation

Complexes Fibres-Fe

Complexes Phytates-Fe

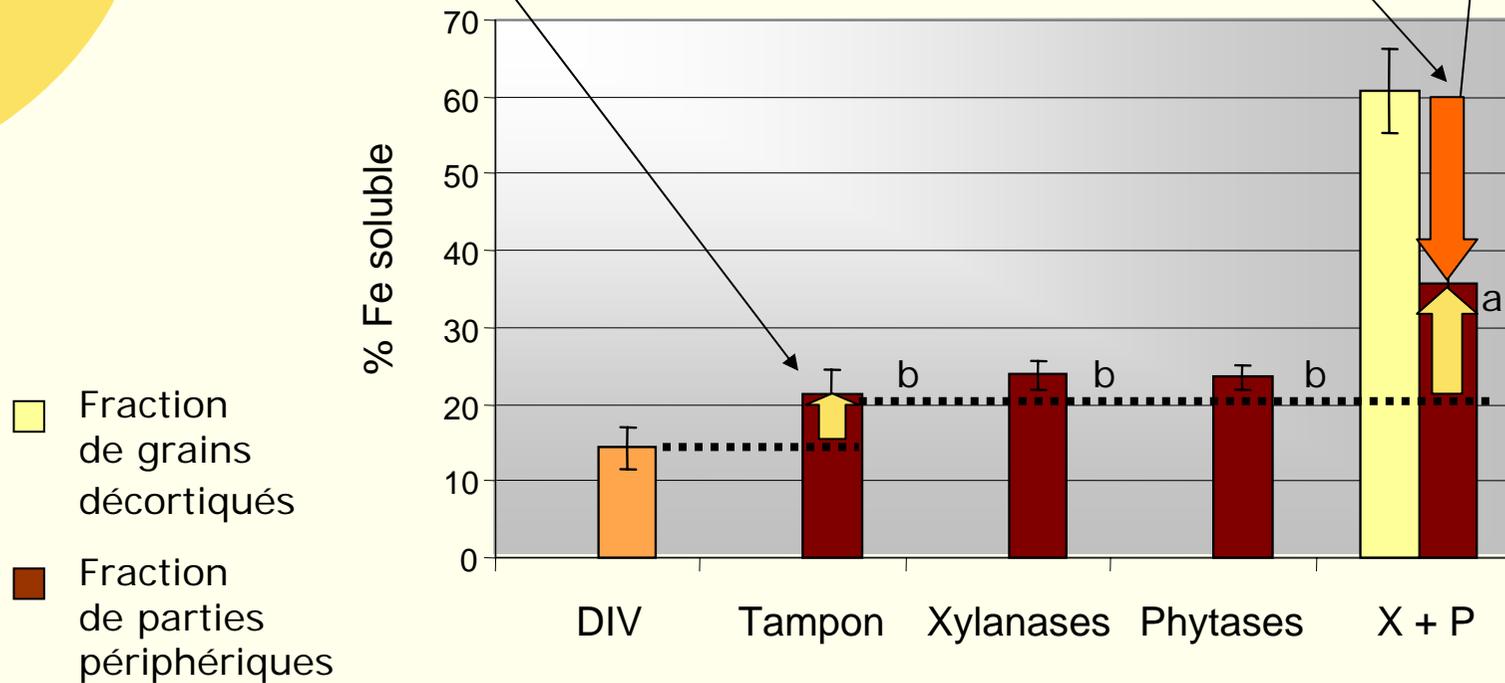
Complexes Fibres-Phytates-Fe ?



## Solubilité du fer

Fer solubilisé uniquement par l'incubation

Complexes entre le fer et les parties périphériques composés dans les fractions phytiques



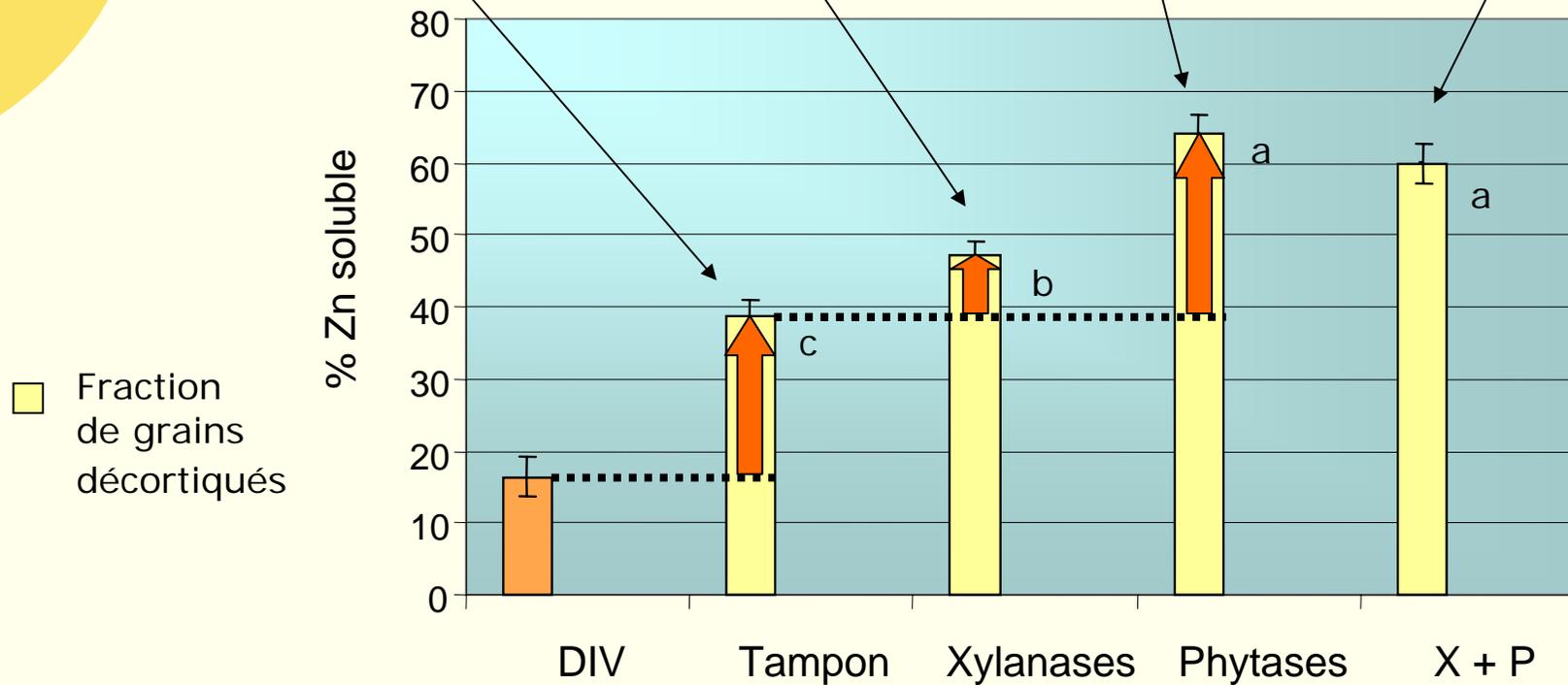
Introduction bibliographique	Problématique et approches expérimentales	Principaux résultats		Conclusion et perspectives
		Contribution des FAN	Effets des procédés	

---

Les phytates, les fibres et très probablement les tanins de la farine de mil créent des complexes avec le fer et réduisent sa solubilité *in vitro*

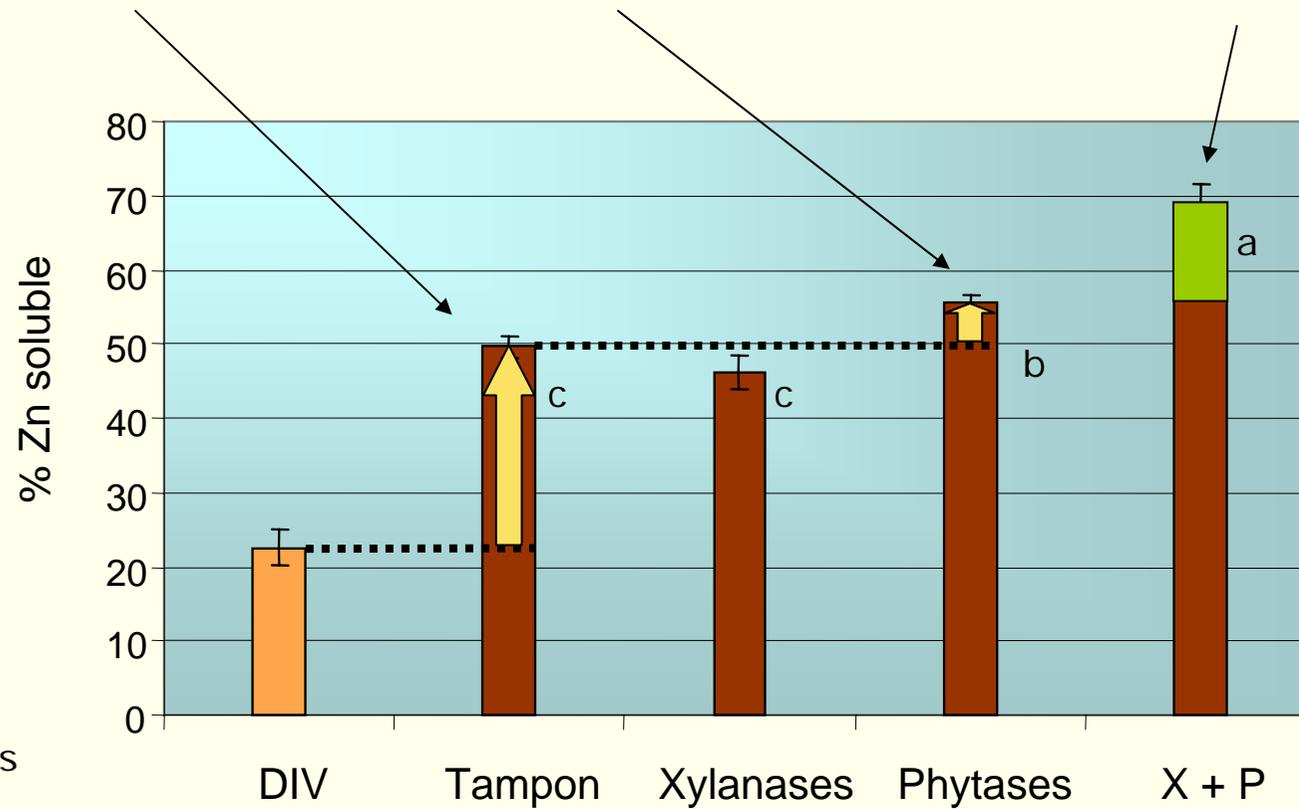
## Solubilité du zinc

Zinc solubilisé uniquement par l'incubation      Complexes Fibres-Zn      Complexes Phytates-Zn      Pas de complexes Fibres-Phytates-Zn



## Solubilité du zinc

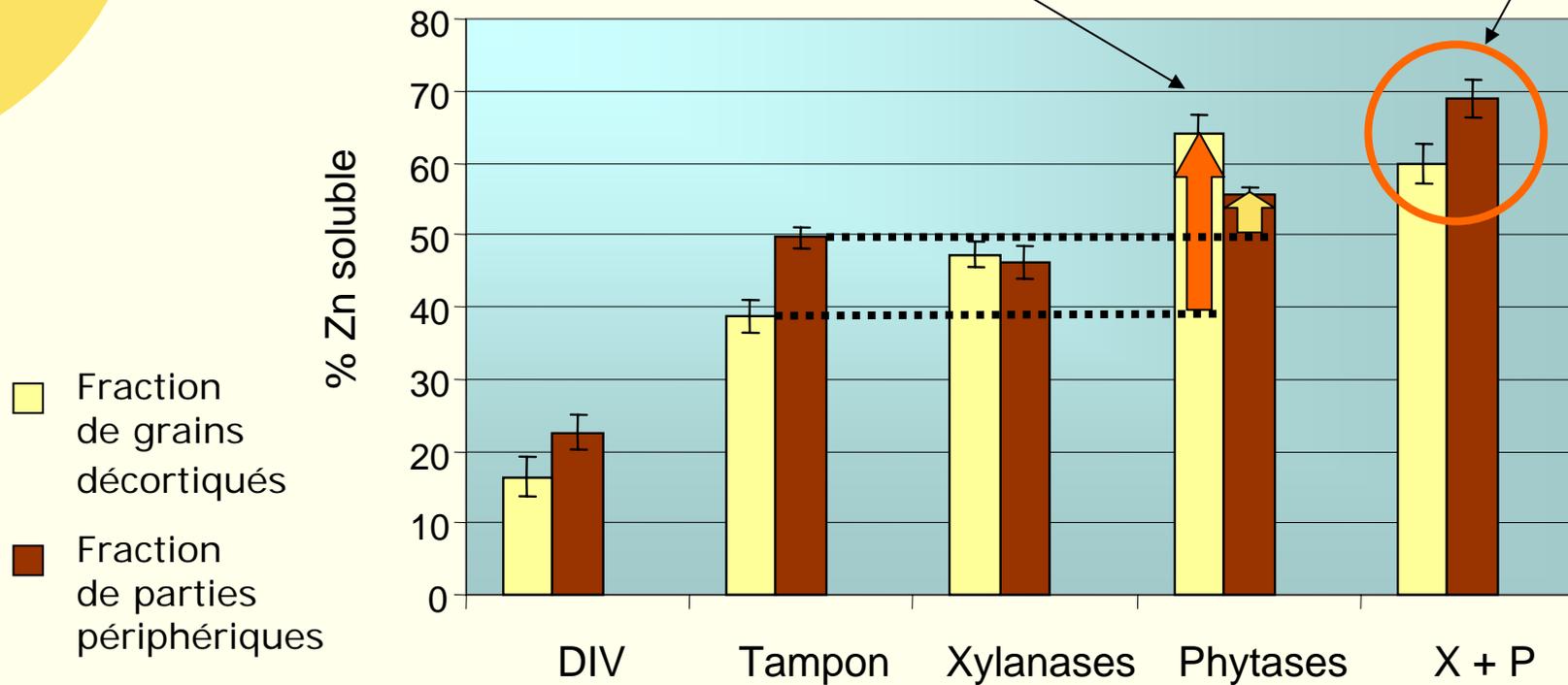
Zinc solubilisé suite à la DIV      Complexes Phytates-Zn      Complexes Fibres-Phytates-Zn



## Solubilité du zinc

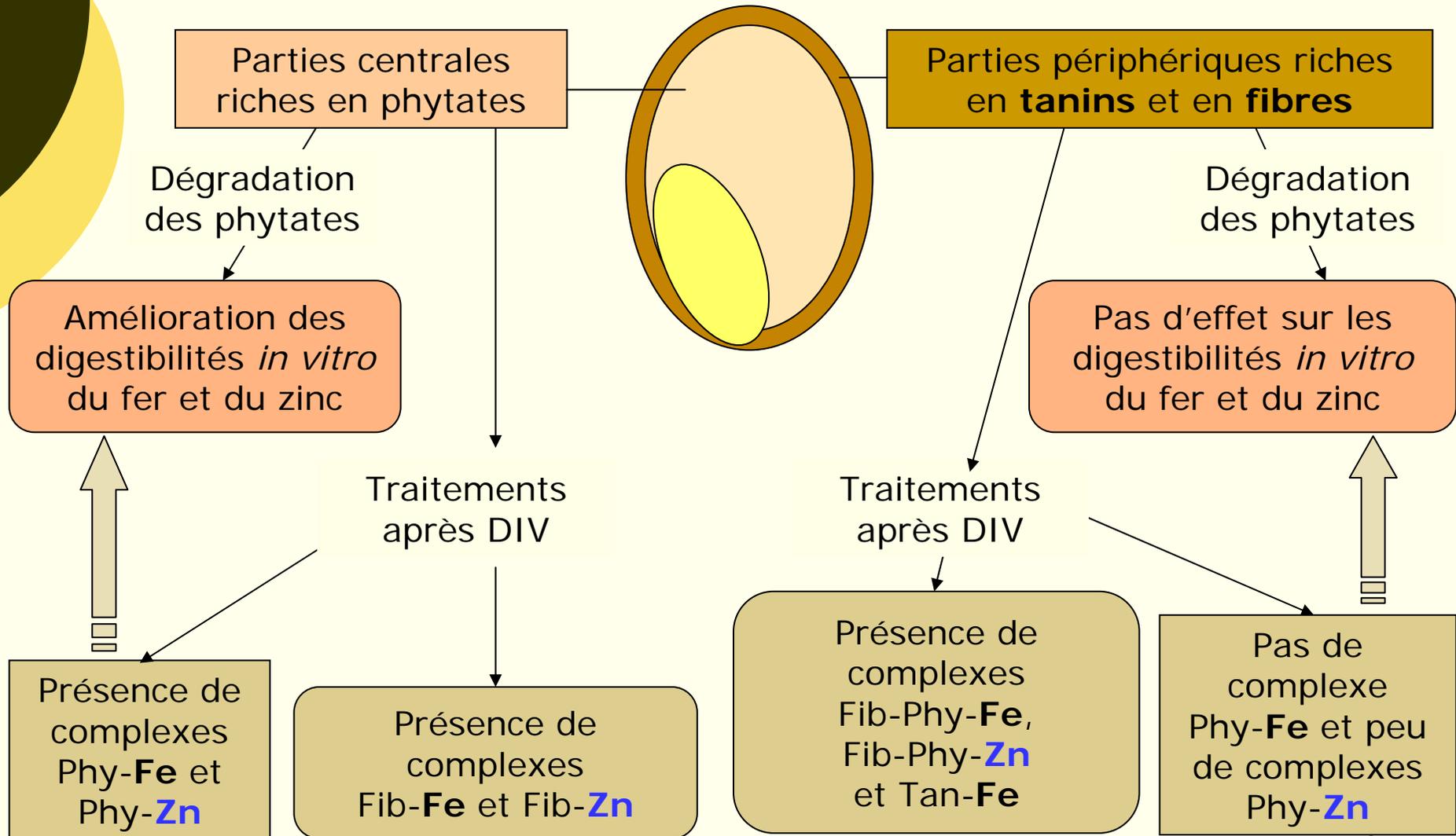
Plus de complexes Phytates-Zn dans les parties centrales du grain que dans les parties périphériques

Pas de complexes Tanins-Zn



Introduction bibliographique	Problématique et approches expérimentales	Principaux résultats		Conclusion et perspectives
		Contribution des FAN	Effets des procédés	

## En résumé...



# Plan

---

## Introduction bibliographique

Carences en fer et en zinc  
Biodisponibilité des minéraux  
Les facteurs anti-nutritionnels (FAN)

## Problématique et approches expérimentales

## Principaux résultats

Importance des FAN dans le grain de mil  
Répartition  
Contribution relative de leur activité anti-nutritionnelle

## Effets des procédés technologiques

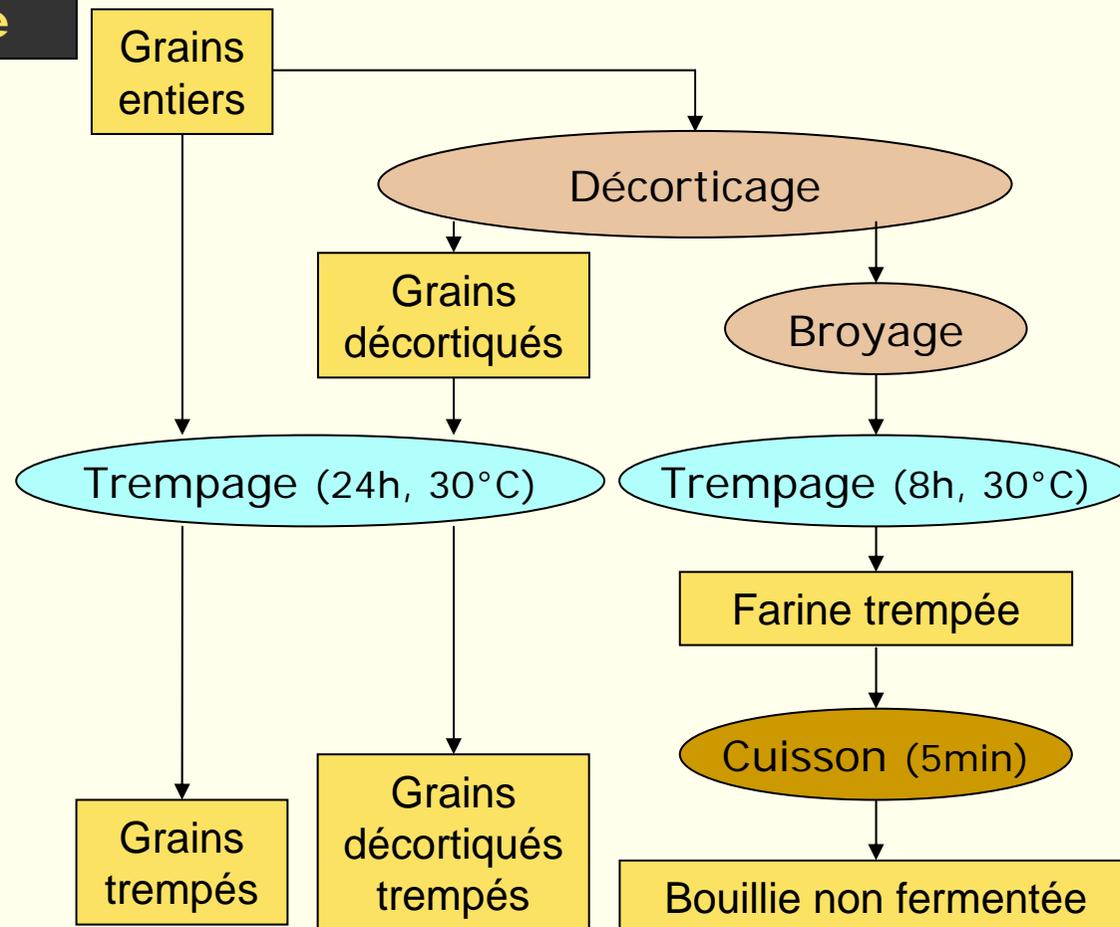
Trempage, décorticage, broyage, cuisson  
Transformation du mil en bouillie fermentée

## Conclusion et perspectives

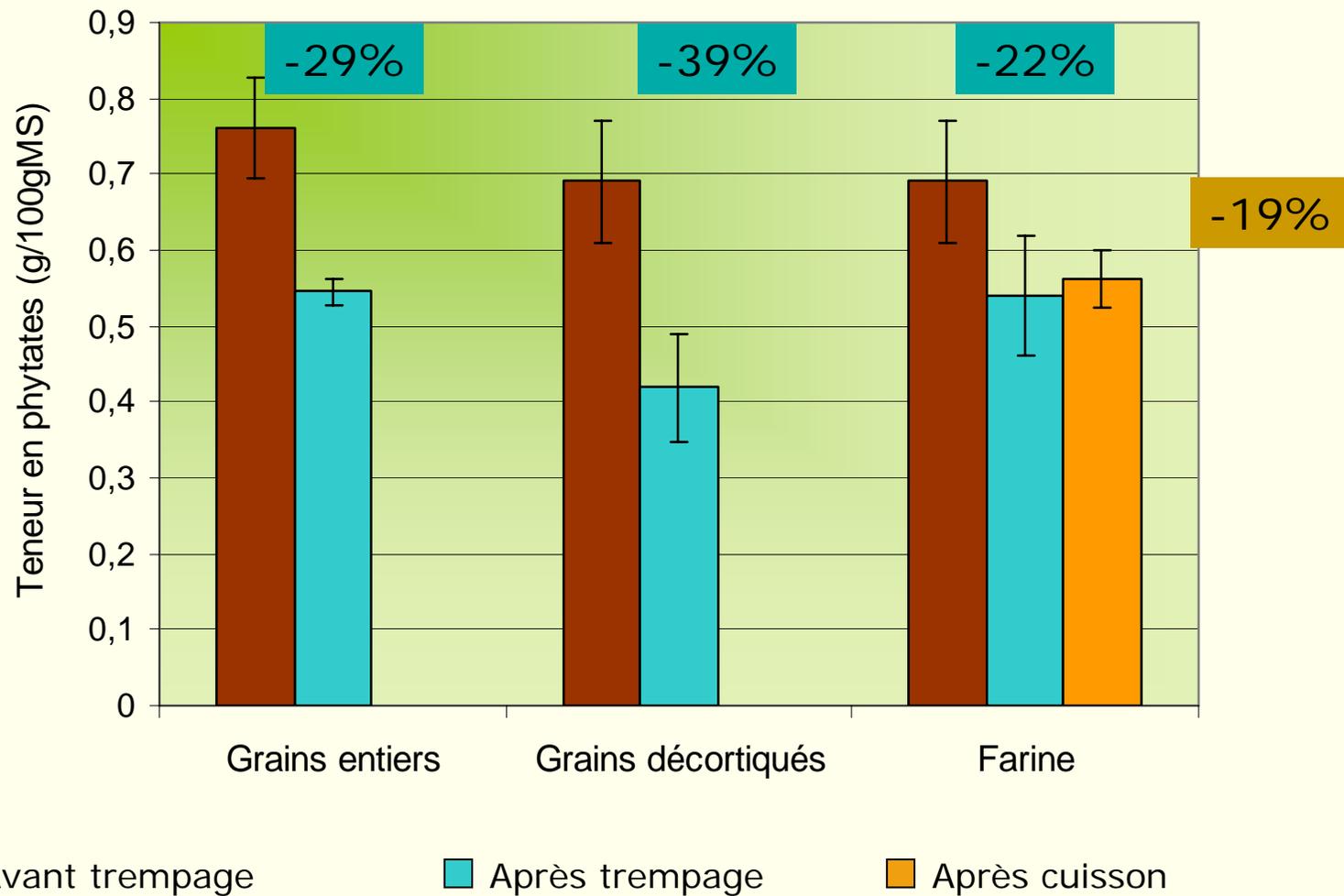
Introduction bibliographique	Problématique et approches expérimentales	Principaux résultats		Conclusion et perspectives
		Facteurs anti-nutritionnels	Trempage, décortilage...	

# Trempage, décortilage, broyage, cuisson

## Méthodologie



Evolution des teneurs en phytates

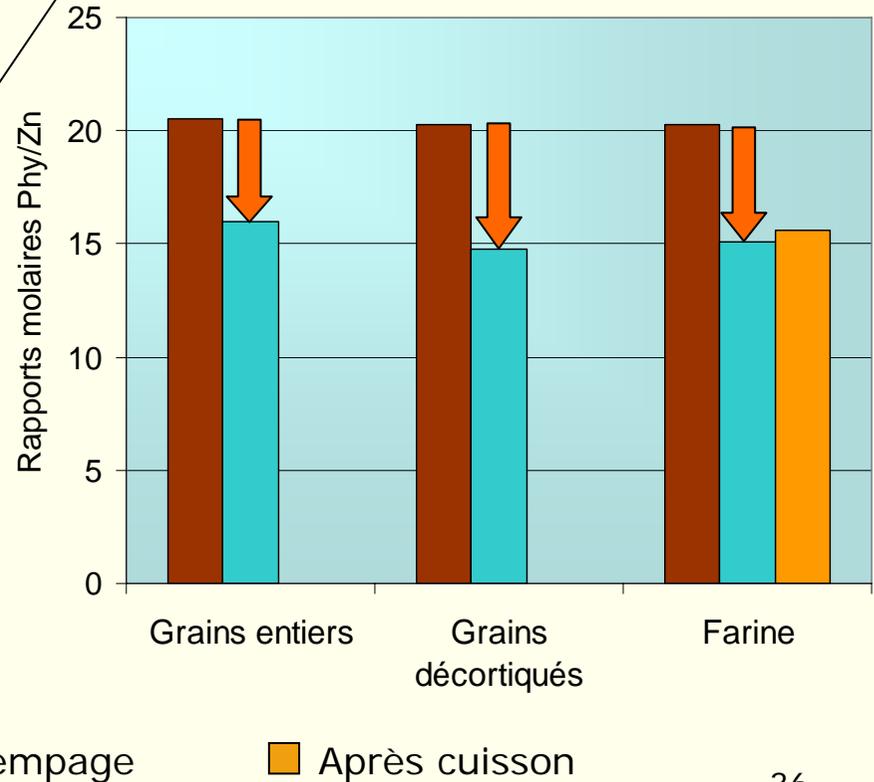
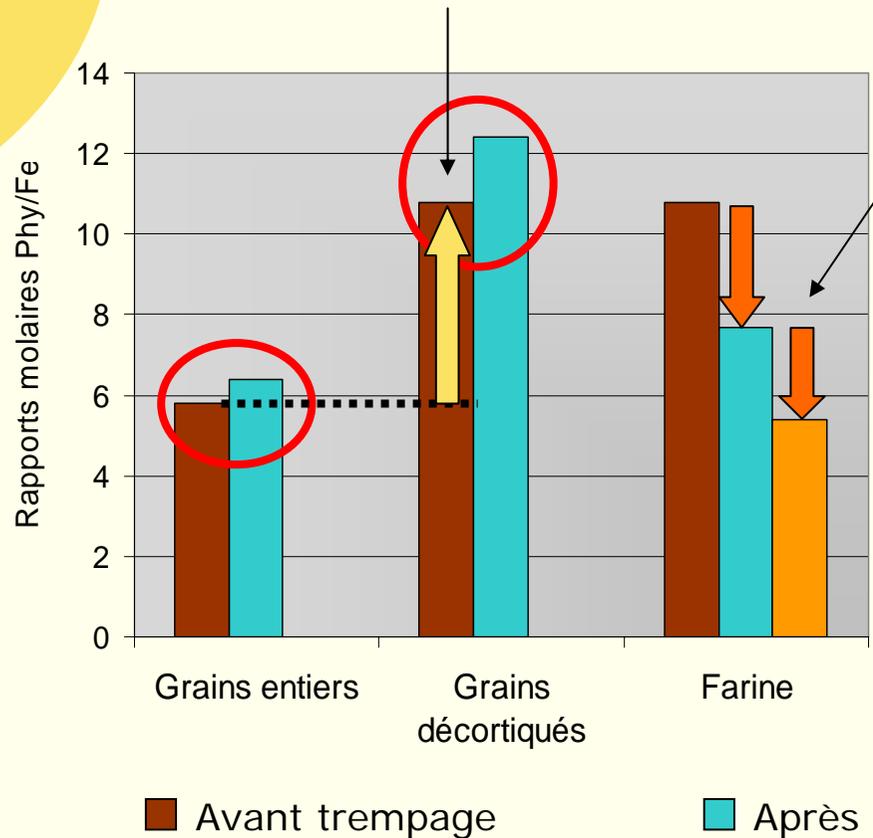


Rapports molaires Phy/Fe

Rapports molaires Phy/Zn

Quantité importante de fer dans les enveloppes du grain

Augmentation de la teneur en fer totale



Introduction bibliographique	Problématique et approches expérimentales	Principaux résultats		Conclusion et perspectives
		Facteurs anti-nutritionnels	Trempage, décorticage...	

## En résumé...

- **Le trempage** provoque :
  - une diffusion et une dégradation des phytates,
  - une diffusion des phytases
  - une diffusion des minéraux (Fe)
  - peu de variation des rapports molaires Phy/Fe et Phy/Zn.
- **Le décorticage avant trempage** entraîne une dégradation plus importante des phytates mais augmente la diffusion du fer.
- **Le trempage de la farine de mil** permet de diminuer légèrement les rapports molaires Phy/Fe et Phy/Zn.
- **La préparation de bouillie à partir de farine trempée** ne réduit pas les teneurs en phytates.

**Les procédés technologiques simples ne permettent pas d'améliorer les biodisponibilités du fer et du zinc**

# Plan

---

## Introduction bibliographique

Carences en fer et en zinc  
Biodisponibilité des minéraux  
Les facteurs anti-nutritionnels (FAN)

## Problématique et approches expérimentales

## Principaux résultats

Importance des FAN dans le grain de mil  
Répartition  
Contribution relative de leur activité anti-nutritionnelle

## Effets des procédés technologiques

Trempage, décorticage, broyage, cuisson  
**Transformation du mil en bouillie fermentée**

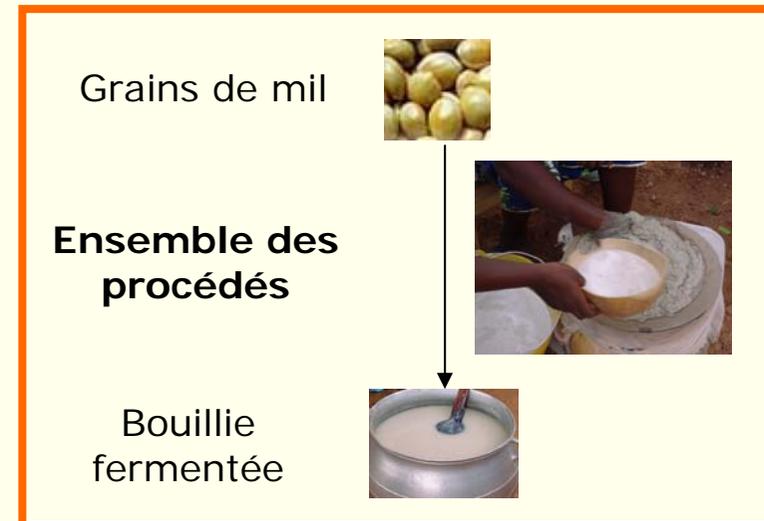
## Conclusion et perspectives

Introduction bibliographique	Problématique et approches expérimentales	Principaux résultats		Conclusion et perspectives
		Facteurs anti-nutritionnels	Transformation du mil...	

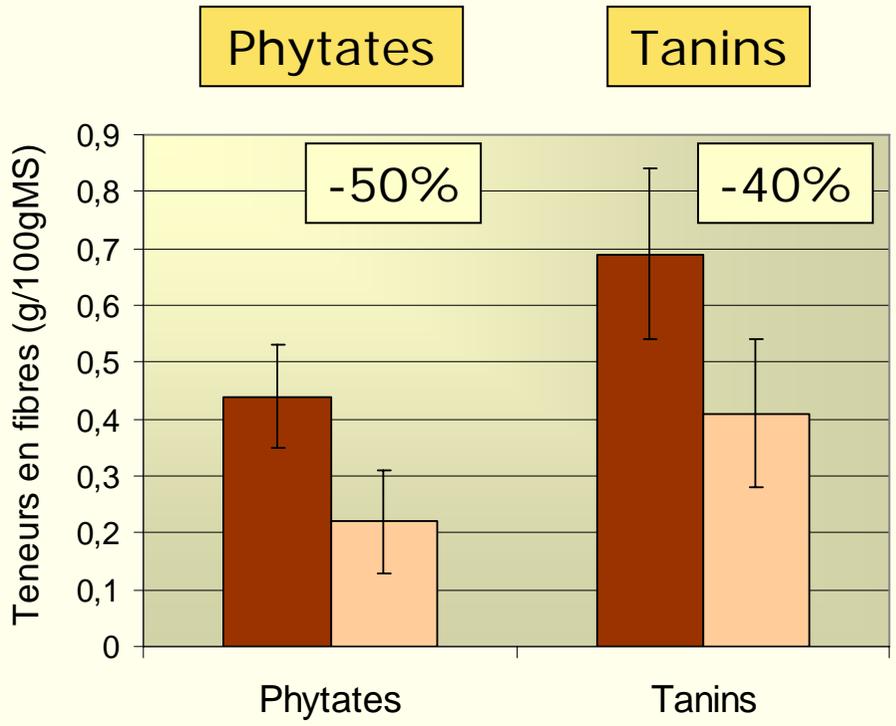
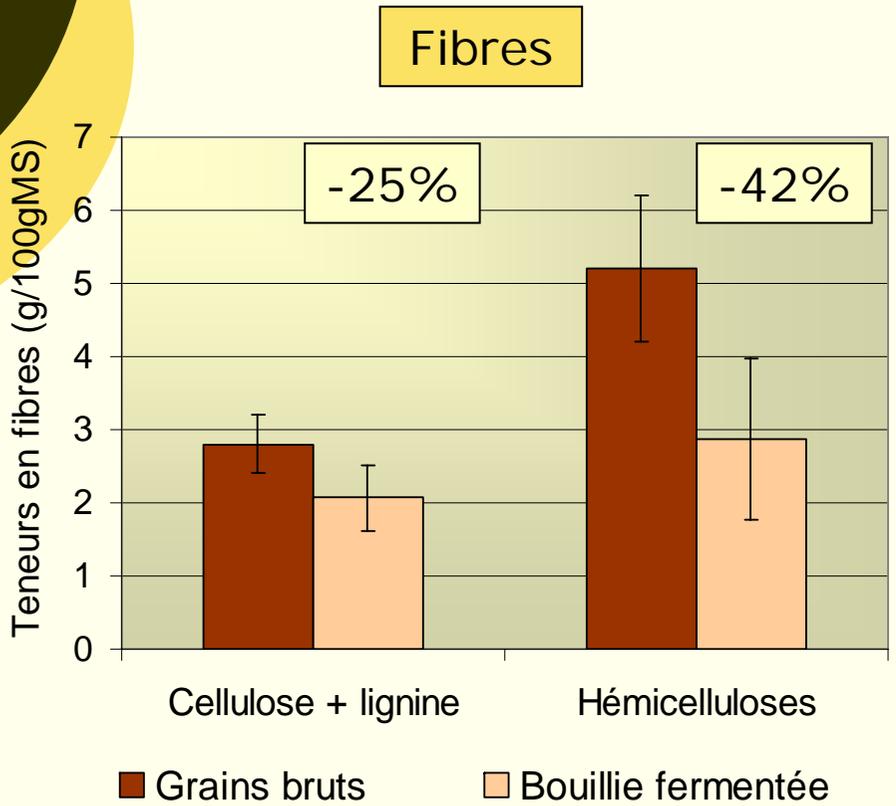
# Transformation du mil en bouillie fermentée

## Méthodologie

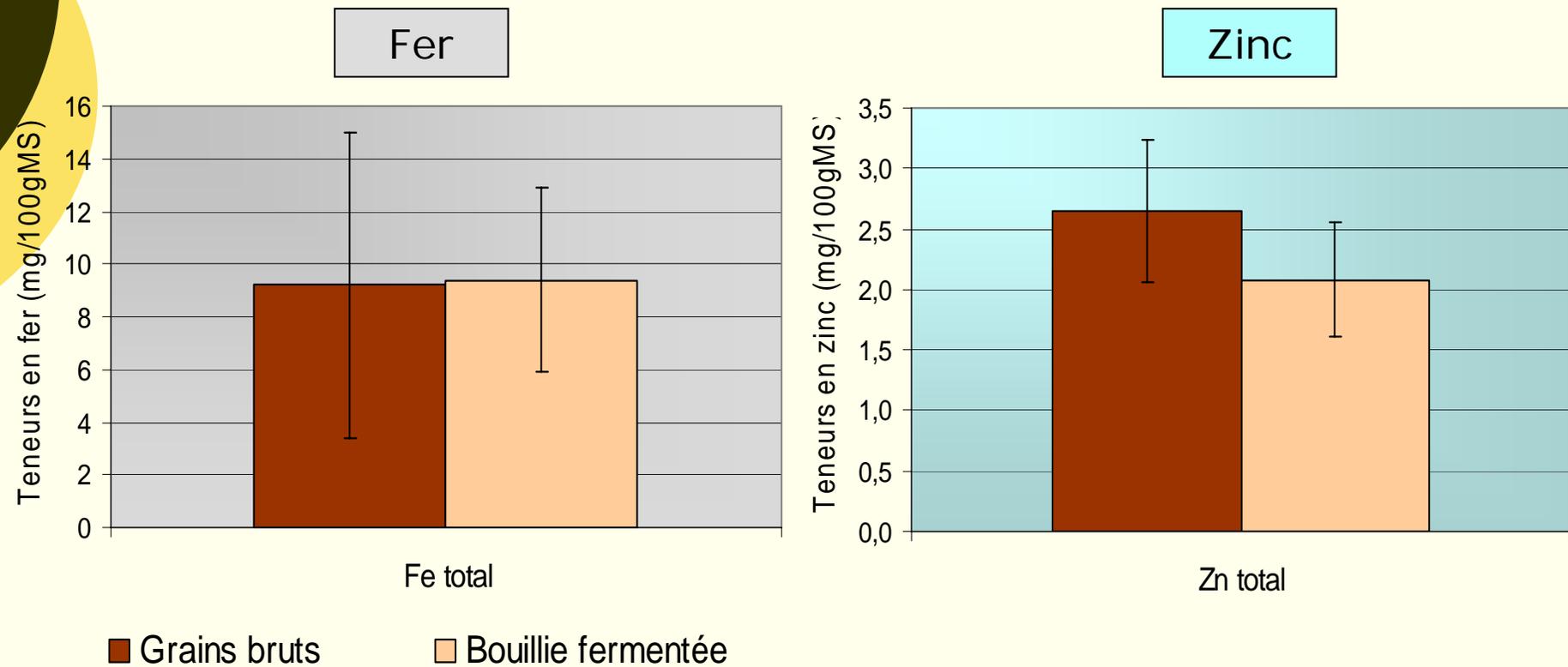
- Etude de la qualité nutritionnelle des bouillies à partir de **48 échantillons de bouillie fermentée** prélevés dans 48 ateliers de Ouagadougou.
- **Sélection de 14 ateliers** dont les bouillies présentaient des différences importantes de teneurs en FAN.
- **Evaluation des taux de réduction des teneurs en FAN et des variations des digestibilités *in vitro* du fer et du zinc** en réponse à l'ensemble des procédés.



# Réductions des teneurs en FAN



## Teneurs en fer et zinc totales

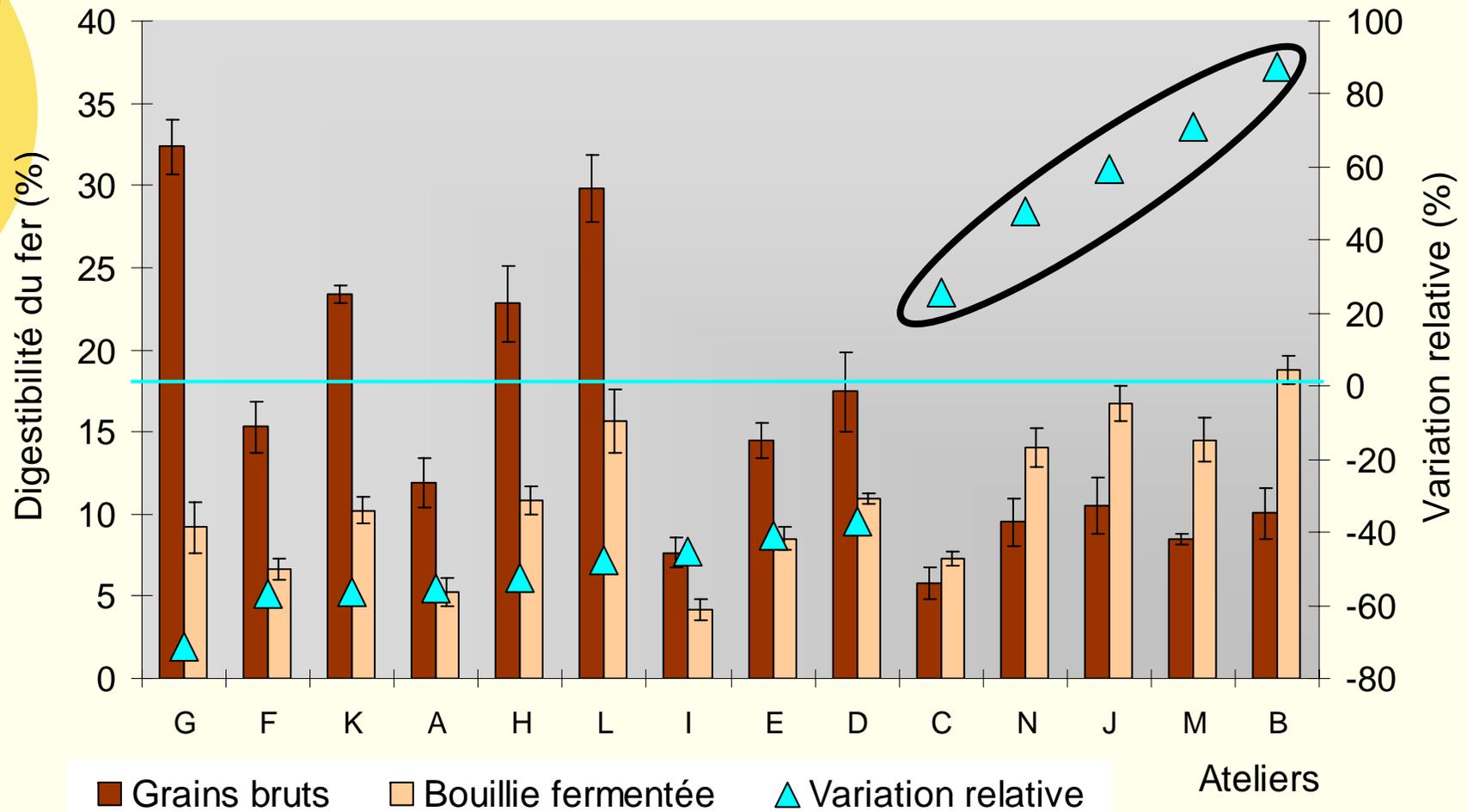


Teneurs recommandées pour les enfants de 6 mois (Lutter et Dewey, 2003) :

Fer : 27,5 mg/100g MS

Zinc : 10,0 mg/100g MS

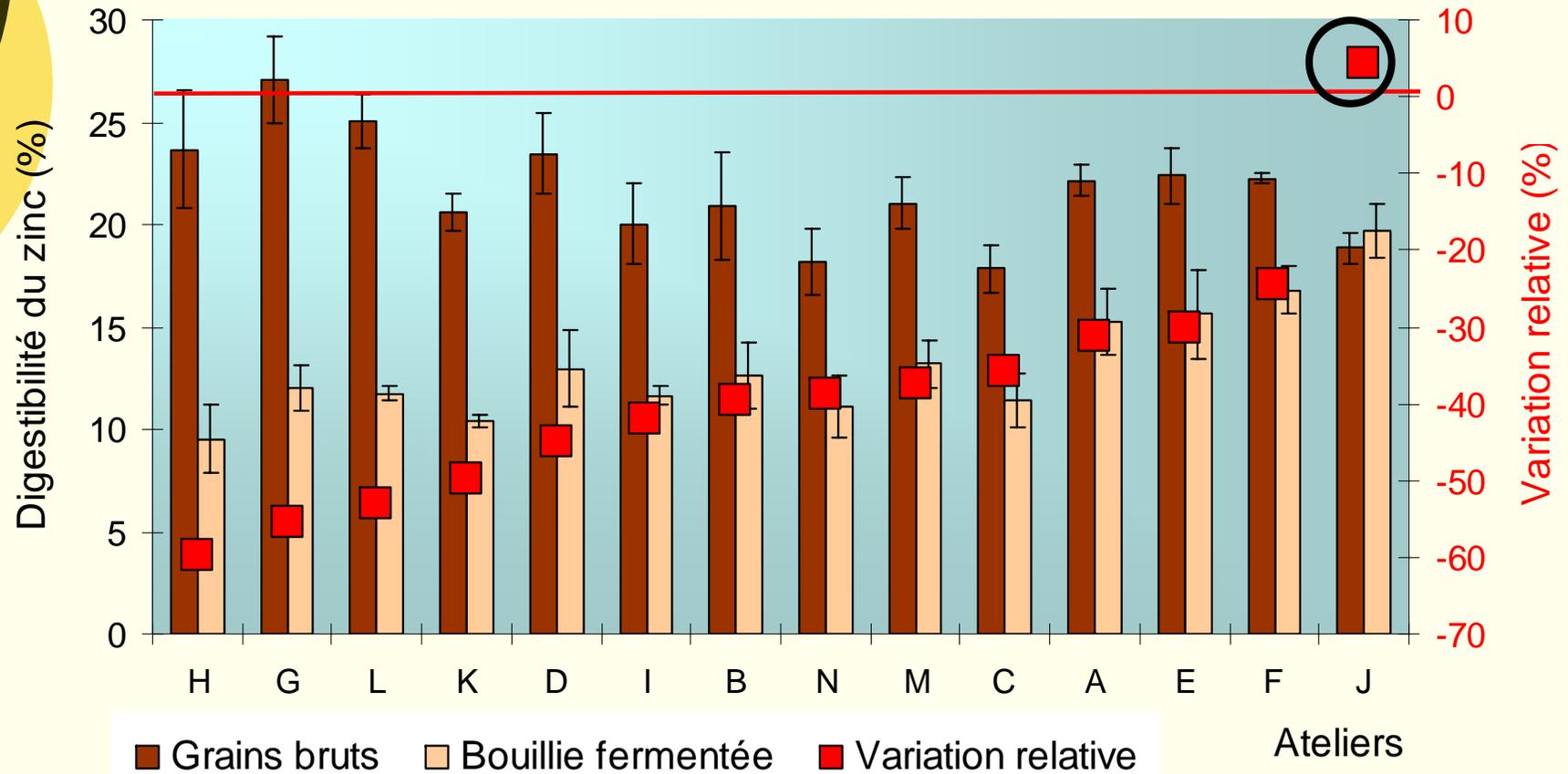
## Variations relatives des DIV du fer



15,7%

10,9%

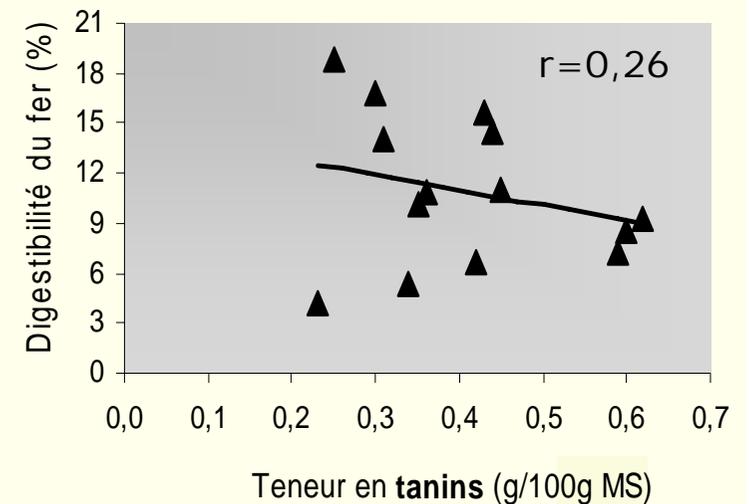
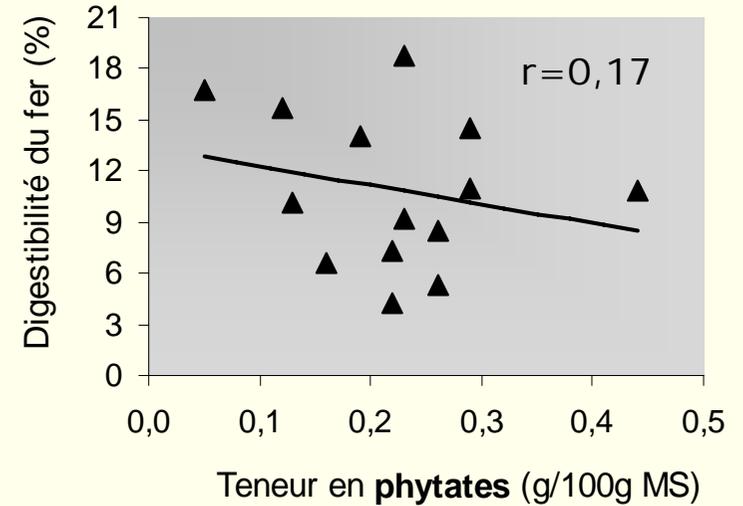
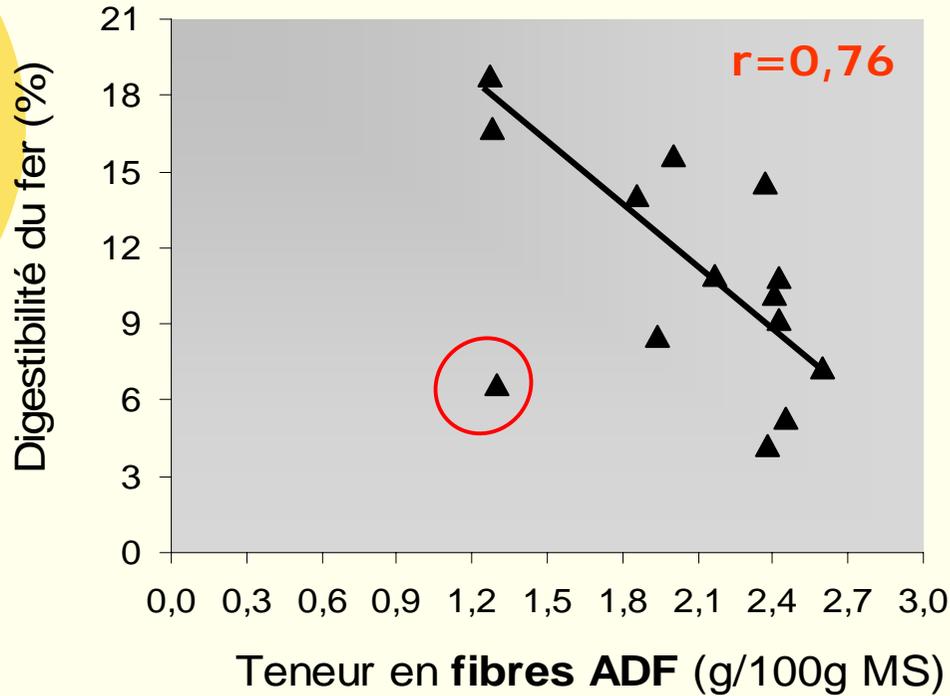
## Variation relative des DIV du zinc



21,7%

13,1%

## Déterminants de la DIV du fer dans les bouillies



Parmi les FAN étudiés, les fibres sont les seuls dont la variabilité explique une part importante de celle de la DIV du fer

Introduction bibliographique	Problématique et approches expérimentales	Principaux résultats		Conclusion et perspectives
		Facteurs anti-nutritionnels	Transformation du mil...	

## Déterminants de la DIV des minéraux dans les bouillies

---

### Il existe des relations entre :

La digestibilité *in vitro* : - du fer et la teneur en fibres

- du zinc et la teneur en phytates

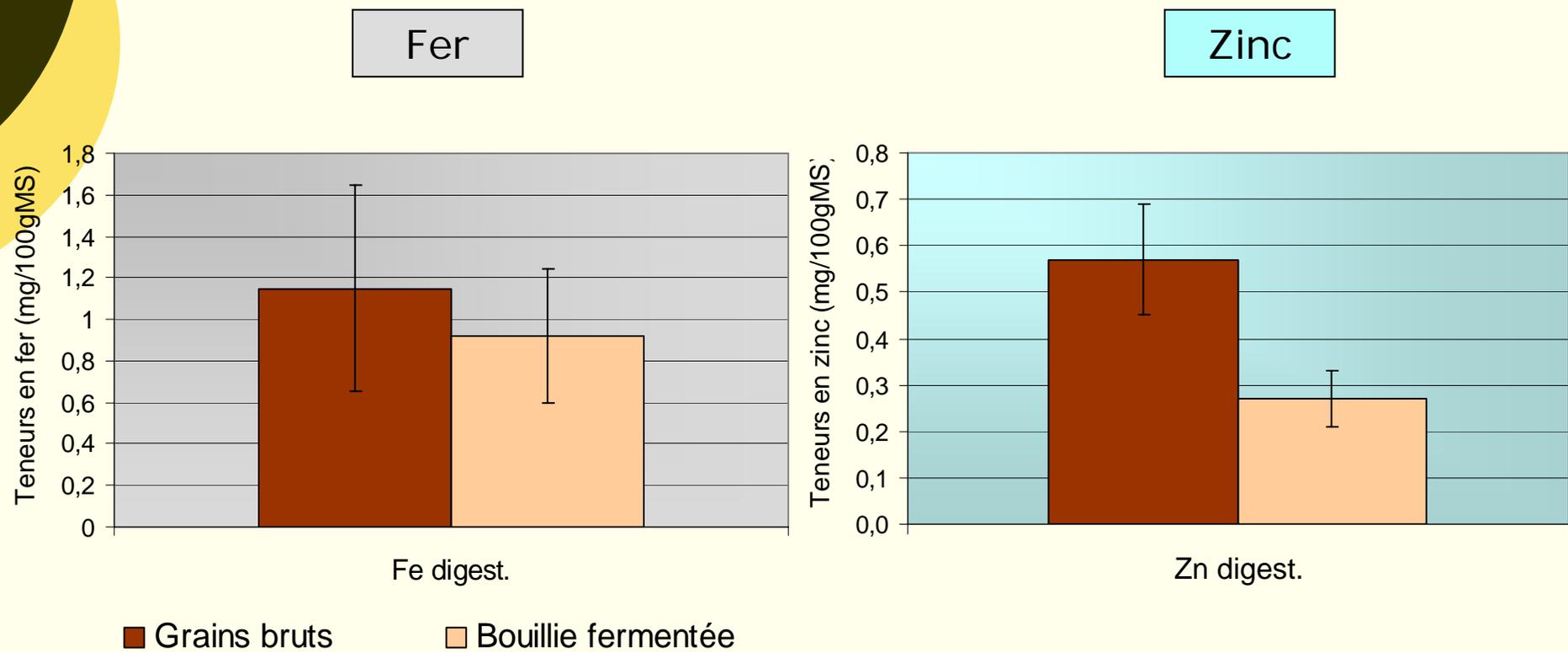
- du fer et du zinc et d'autres paramètres,  
(pH de la bouillie, teneurs totales en fer et zinc)

### Confirmant ainsi :

- **l'importance des complexes Fibres-Fe et Phytates-Zn** identifiés dans le grain de mil
- **l'intérêt de rechercher des relations entre les DIV et les teneurs en FAN** en tenant compte de la part de variabilité liée aux autres paramètres.

Introduction bibliographique	Problématique et approches expérimentales	Principaux résultats		Conclusion et perspectives
		Facteurs anti-nutritionnels	Transformation du mil...	

## Teneurs en fer et zinc digestibles



Introduction bibliographique	Problématique et approches expérimentales	Principaux résultats		Conclusion et perspectives
		Facteurs anti-nutritionnels	Transformation du mil...	

## En résumé...

---

- **La transformation du mil en bouillie fermentée engendre :**
  - des variations positives ou négatives des teneurs en fer totales
  - des réductions des teneurs en FAN
  - des diminutions des digestibilités *in vitro* du fer et du zinc
  - des diminutions des teneurs en fer et zinc digestibles
- **Les variations de teneurs en FAN ne sont donc pas les seuls facteurs explicatifs** des variations des DIV du fer et du zinc.

# Plan

---

## Introduction bibliographique

- Carences en fer et en zinc
- Biodisponibilité des minéraux
- Les facteurs anti-nutritionnels (FAN)

## Problématique et approches expérimentales

## Principaux résultats

- Importance des FAN dans le grain de mil

  - Répartition

  - Contribution relative de leur activité anti-nutritionnelle

- Effets des procédés technologiques

  - Trempage, décorticage, broyage, cuisson

  - Transformation du mil en bouillie fermentée

## Conclusion et perspectives

Introduction bibliographique	Problématique et approches expérimentales	Principaux résultats		Conclusion et perspectives
		Facteurs anti-nutritionnels	Effets des procédés	

Quelle est la contribution relative des différents FAN à la faible biodisponibilité du fer et du zinc dans le grain de mil ?

	Parties centrales		Parties périphériques	
	Fer	Zinc	Fer	Zinc
Phytates	XX	XXX		X
Fibres	XX	X		
Phytates-Fibres	X		XX	XX
Tanins (ou autres)			XXX	?

- ➔ **Non seulement les phytates, mais aussi les fibres et probablement les tanins limitent la biodisponibilité du fer et du zinc.**
- ➔ **La réduction de leur teneur doit être recherchée au même titre que celle des phytates.**

Introduction bibliographique	Problématique et approches expérimentales	Principaux résultats		Conclusion et perspectives
		Facteurs anti-nutritionnels	Effets des procédés	

## Quelles sont les voies envisageables pour l'amélioration des aliments de complément ?

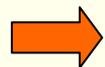
- ❑ **Les teneurs en fer et en zinc totales** dans les aliments de complément préparés à partir de céréales sont insuffisantes.



### **Fortification nécessaire**

(complément minéral et vitaminique, ingrédients riches en minéraux)

- ❑ **Compte tenu des faibles biodisponibilités du fer et du zinc après :**
  - **Le trempage, le décorticage, le broyage et la cuisson,** appliqués seuls ou en combinaison
  - L'ensemble des procédés intervenant au cours de la **transformation du mil en bouillie fermentée**



**Nécessité d'étudier la biodisponibilité, dans les bouillies, des minéraux ajoutés au cours de leur préparation et, éventuellement, d'en définir les modalités d'amélioration**

Introduction bibliographique	Problématique et approches expérimentales	Principaux résultats		Conclusion et perspectives
		Facteurs anti-nutritionnels	Effets des procédés	

## Quelles sont les voies envisageables pour l'amélioration des aliments de complément ?

- ❑ Compte tenu de :
  - La complexité des phénomènes engendrés par une succession de **procédés technologiques**
  - La complexité des **interactions entre FAN et minéraux** au sein de la matrice alimentaire


**Ces modalités d'amélioration doivent tenir compte :**

- **de l'ensemble des composés présents dans la matrice :**  
**les différents FAN et les autres composés pouvant la faire varier**
- **de l'effet de l'ensemble des procédés intervenant au cours de leur préparation**



**Merci de votre attention**