



# La production énergétique à partir de la biomasse forestière : le devenir des nutriments et du carbone

Jessica François, Mathieu Fortin et Anthony Dufour



Journées CAQSI

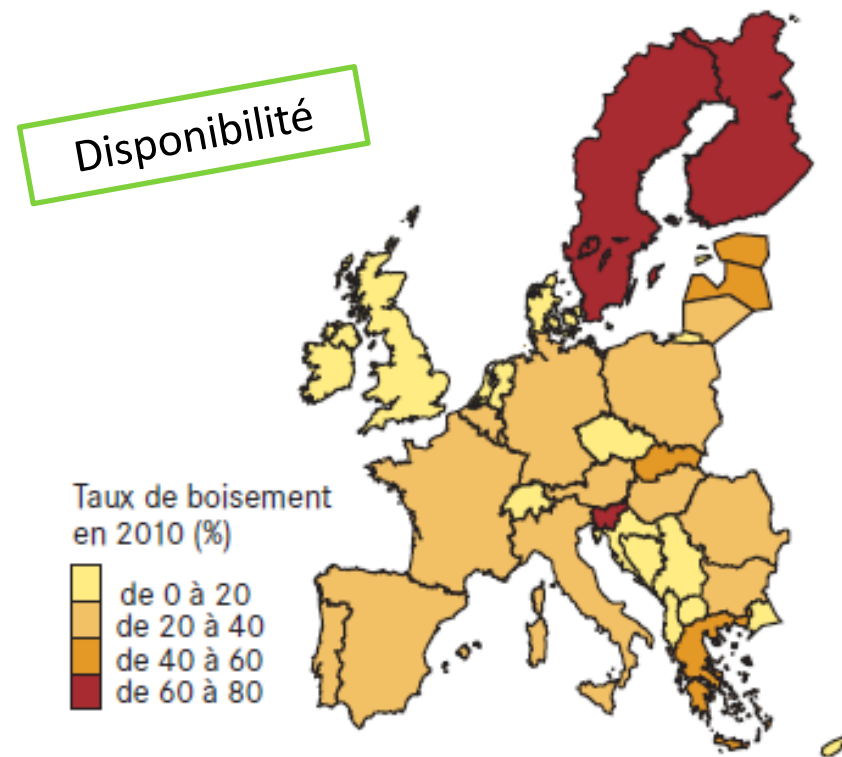
les 8 et 9 avril 2014, Gembloux, Belgique



## Contexte

Intérêt croissant de la biomasse à des fins énergétiques...

En Europe : 37,5% de la surface recouverte par des forêts



Source: FAO - FRA 2010

# Contexte

Intérêt croissant de la biomasse à des fins énergétiques...

23 % d'énergie renouvelable  
dans le mix énergétique français d'ici à 2020

Politique incitative



## Contexte

Intérêt croissant de la biomasse à des fins énergétiques...

Source carbonée ↔ source fossile

Possibilité de transformer la biomasse dans des installations similaires

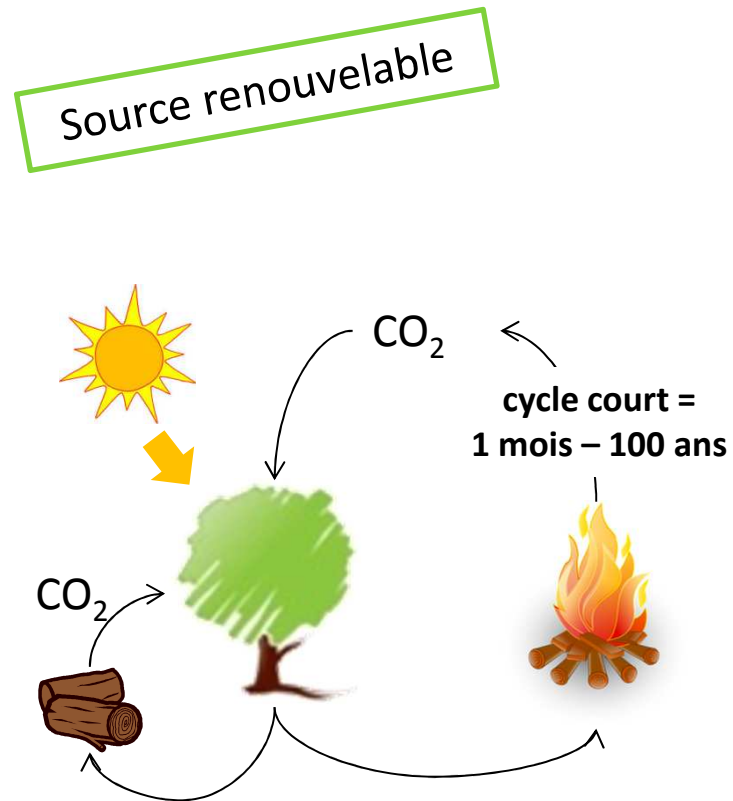
>> Production à grande échelle et bon rendement



## Contexte

Intérêt croissant de la biomasse à des fins énergétiques...

Lutte contre le changement climatique  
en limitant les émissions de CO<sub>2</sub> fossiles



## Contexte

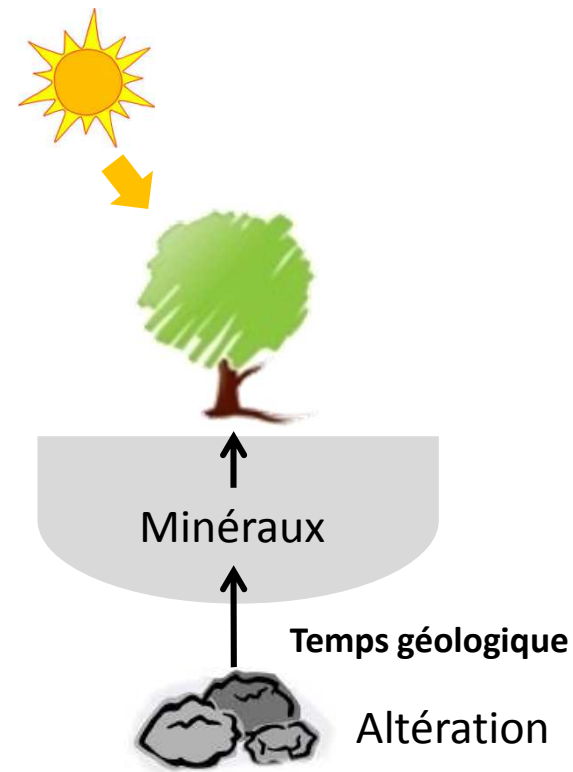
Intérêt croissant de la biomasse à des fins énergétiques...

... mais source limitée, épuisable

Minéraux = essentiels à la croissance de l'arbre

Risque d'appauvrissement des sols

↓ productivité des forêts  
utilisation de fertilisants chimiques



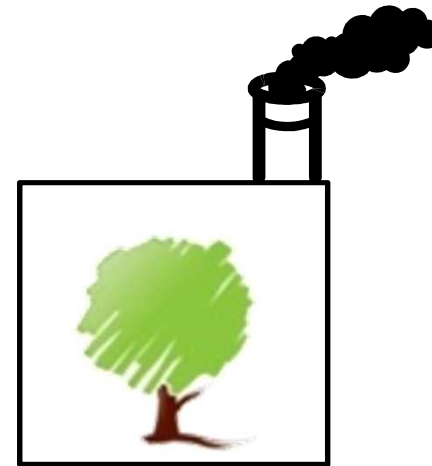
## Contexte

Intérêt croissant de la biomasse à des fins énergétiques...

... mais source limitée, épuisable

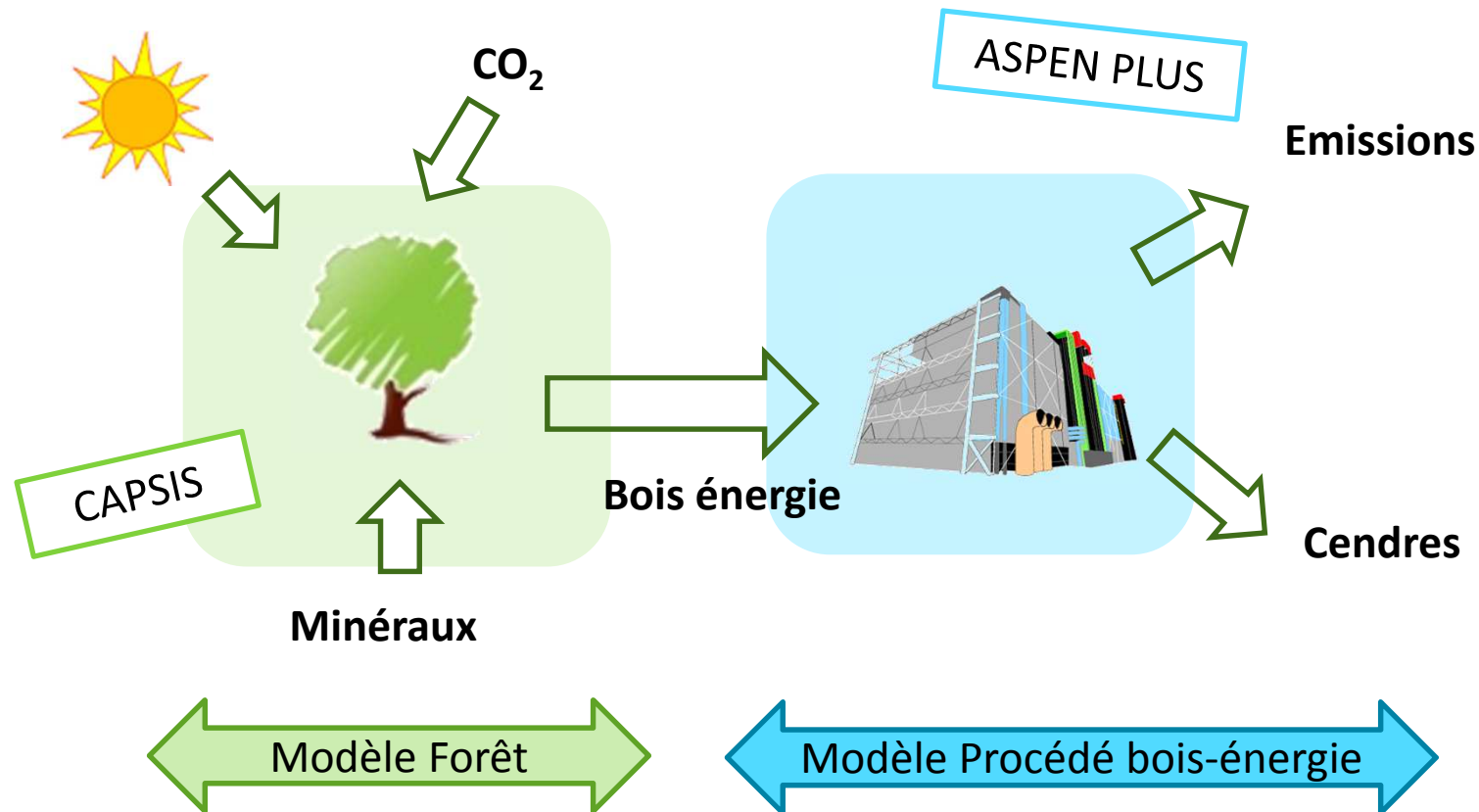
Emissions néfastes pour l'environnement

CO, NO<sub>x</sub>, N<sub>2</sub>O, SO<sub>2</sub>, HAP, etc.



# Objectif de notre étude

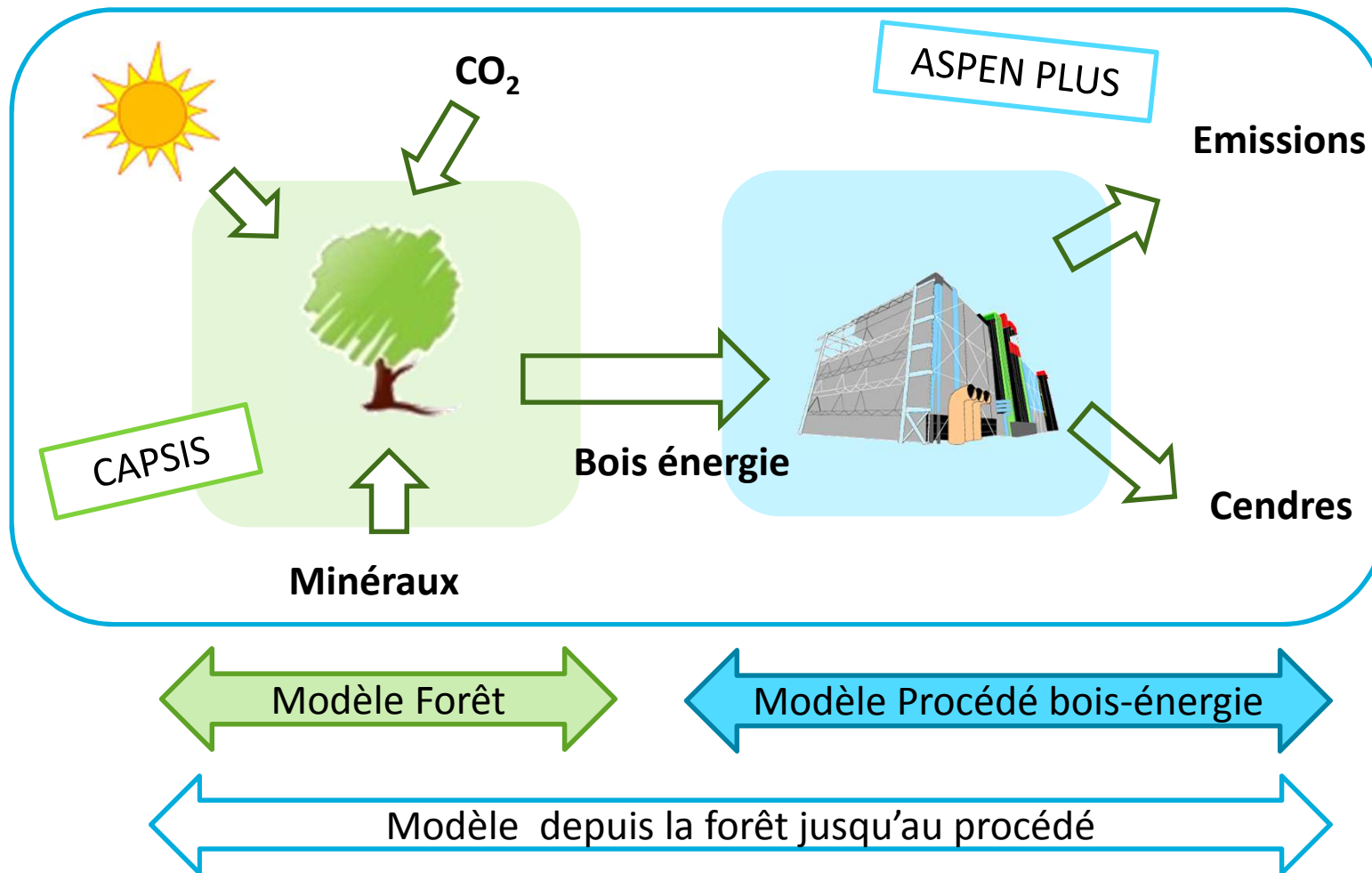
Prédire le devenir des minéraux et du carbone depuis la forêt jusqu'à la centrale biomasse énergie





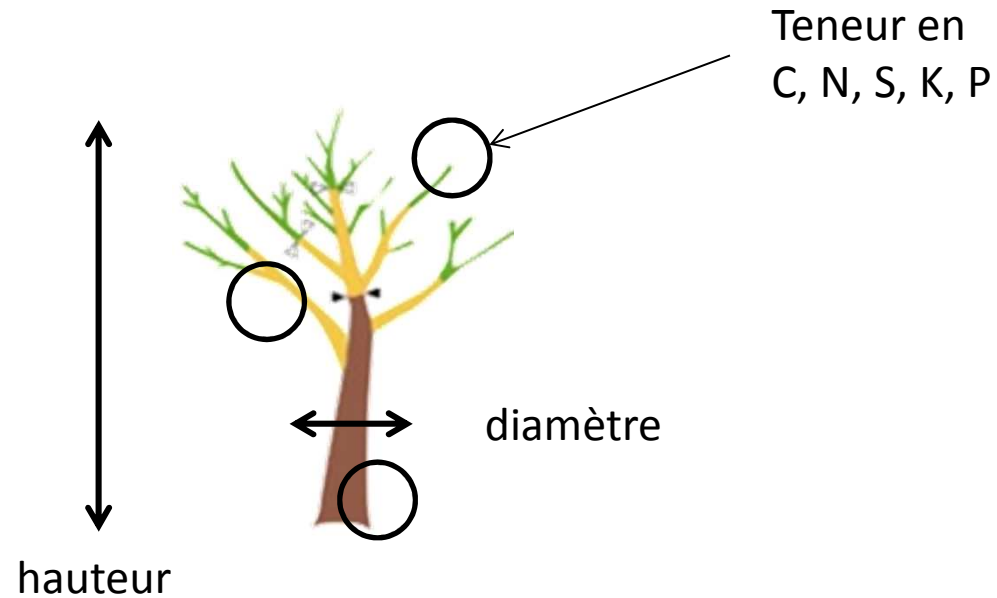
## Comment ?

Intégration d'un modèle de forêt dans un modèle de procédé



# Plate-forme Capsis

Prédiction de la croissance du peuplement



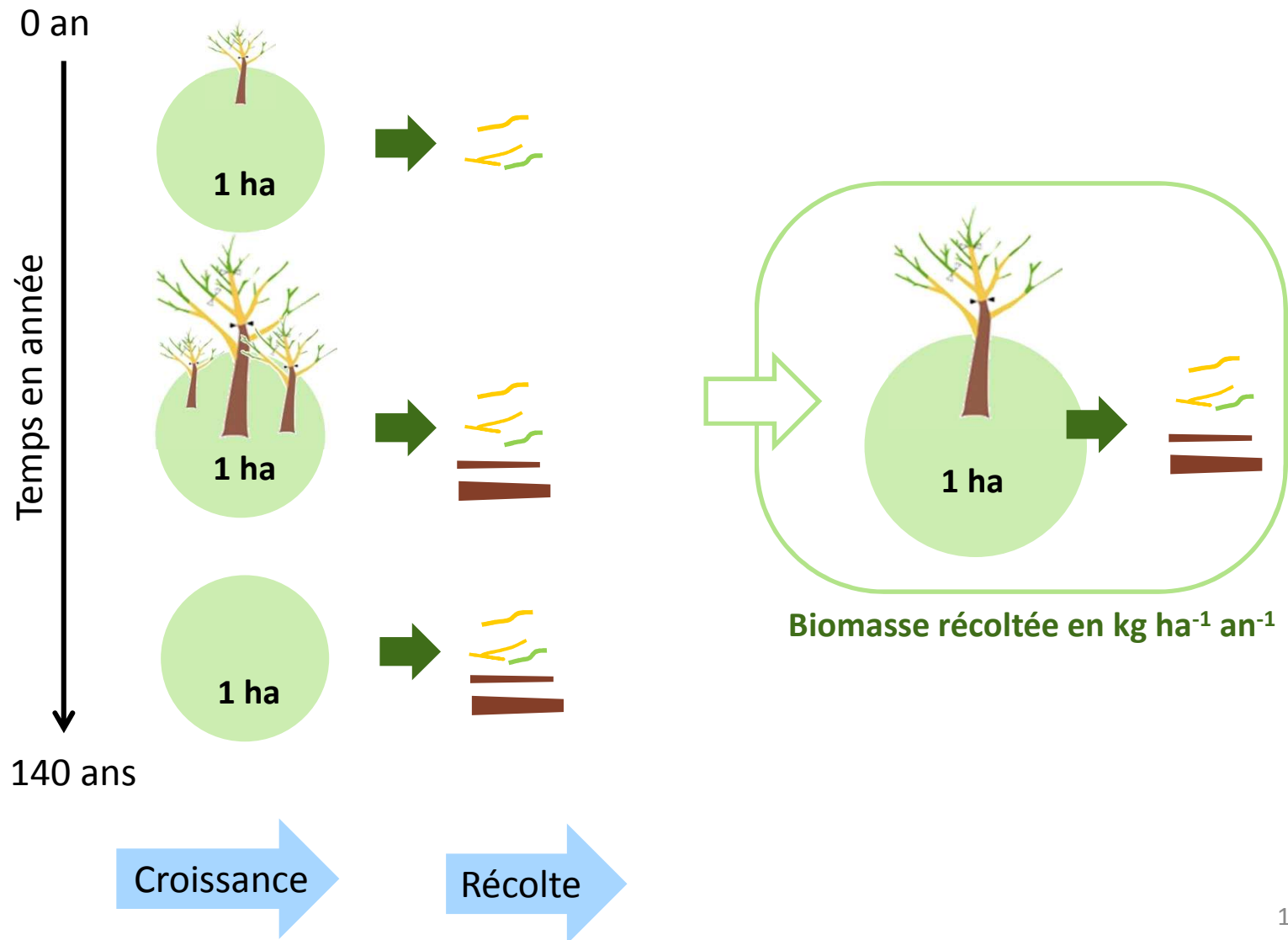
Peuplement régulier de hêtre européen  
Fort potentiel de valorisation en Lorraine

→ modèle FAGACEES

Cas d'étude

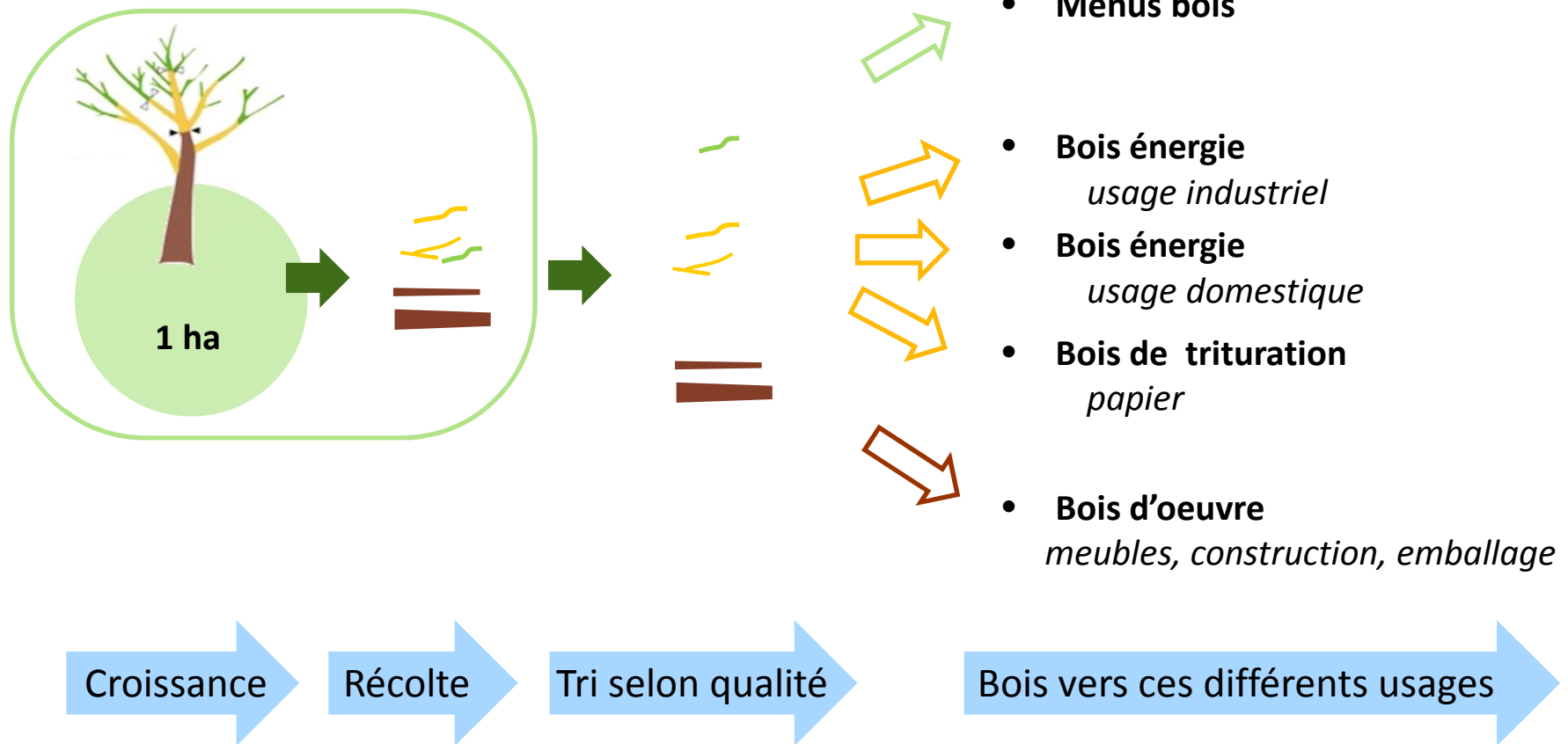
# Plate-forme Capsis

Et des récoltes du bois le long de la durée de vie du peuplement



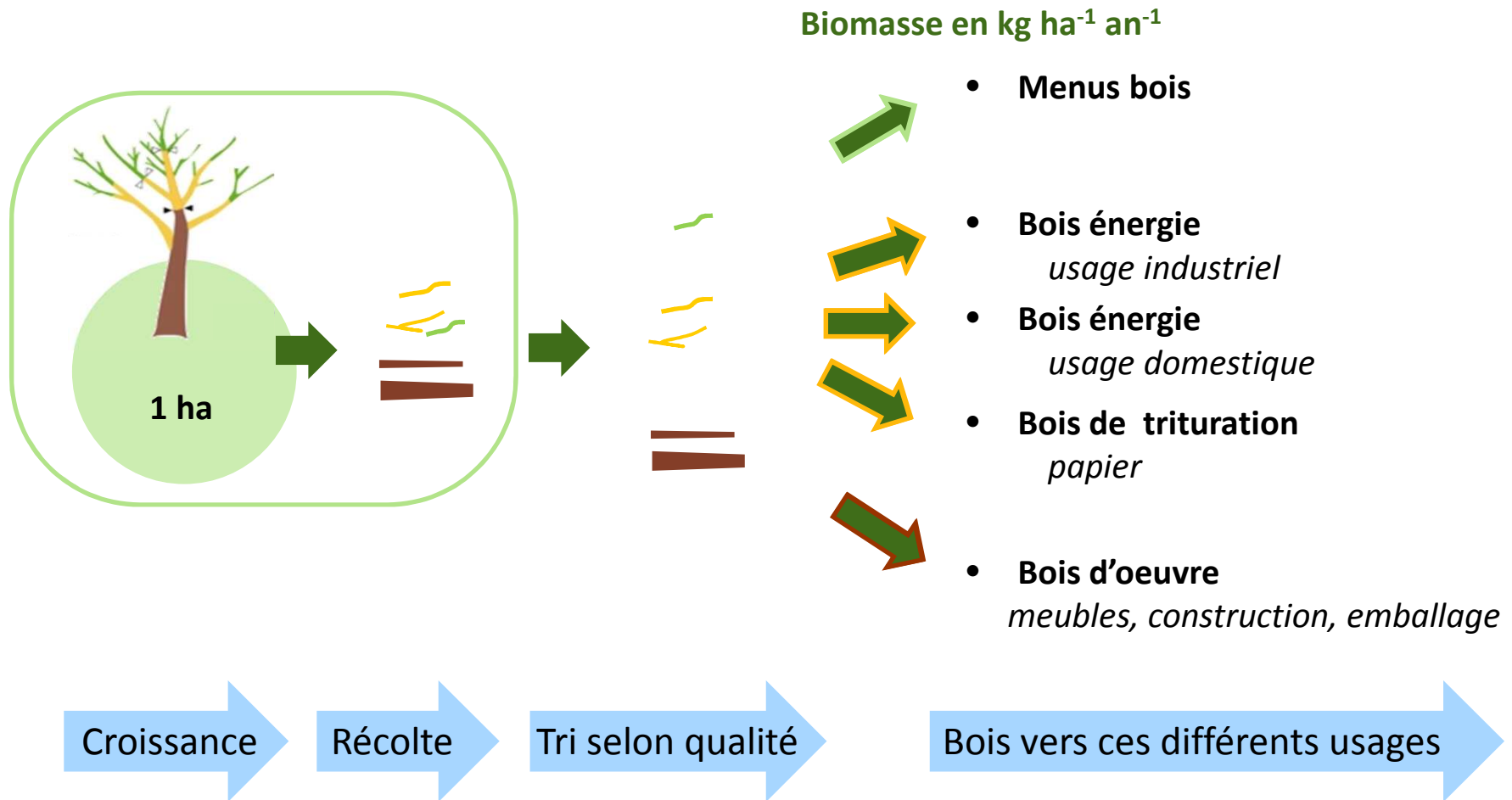
# L'Outil Carbone

Gestion des usages du bois récolté



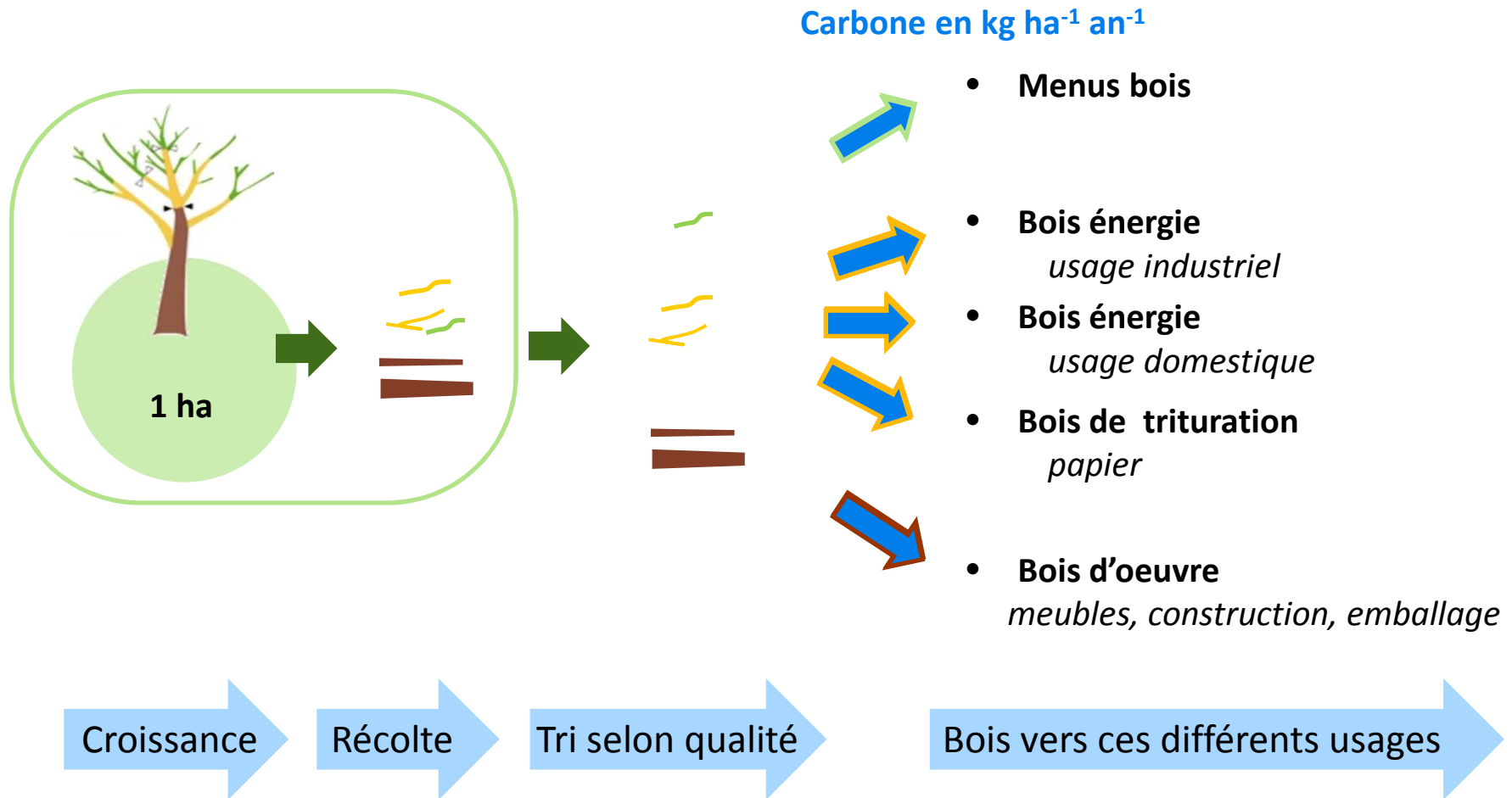
# L'Outil Carbone

Gestion des usages du bois récolté



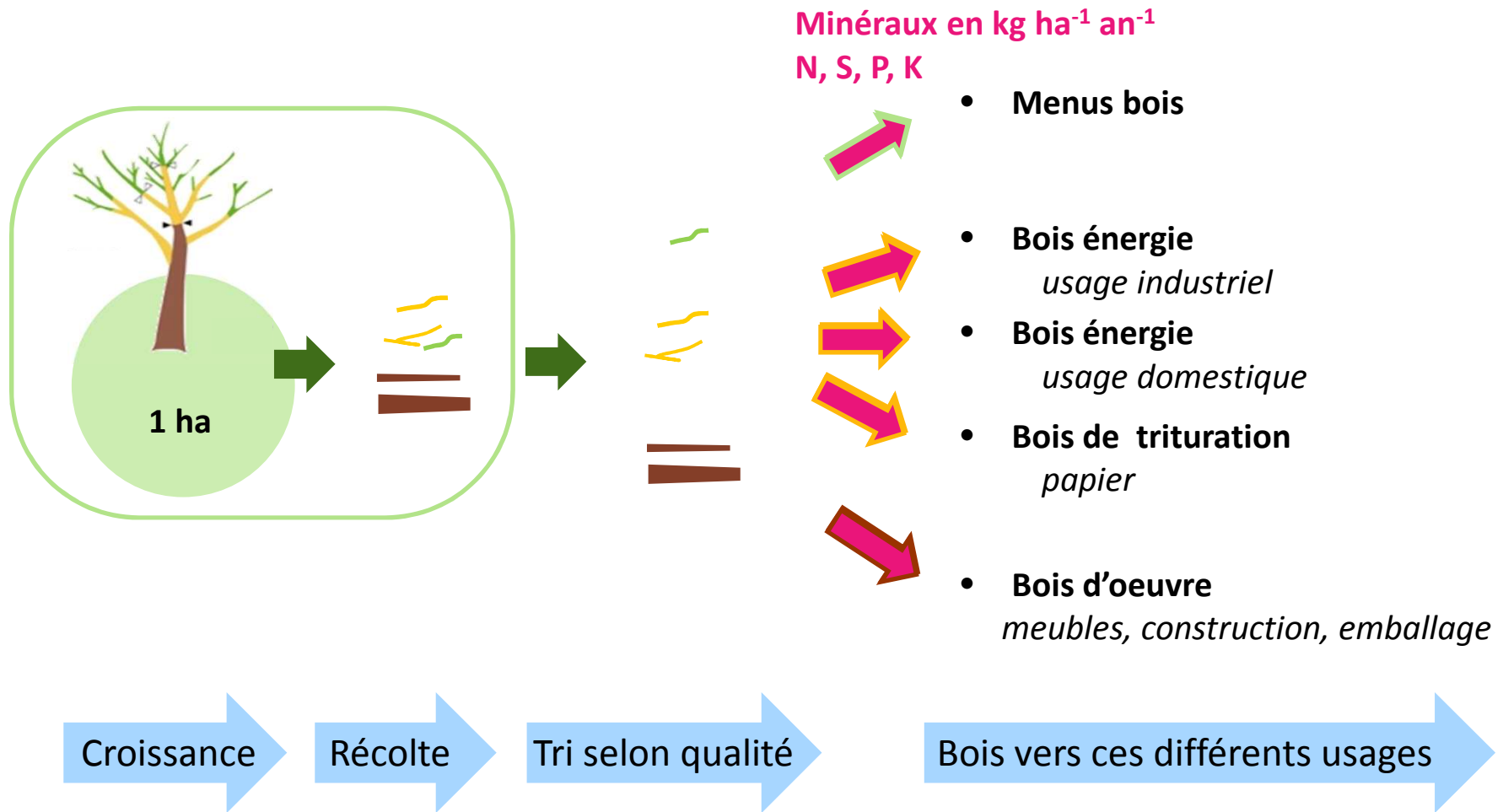
# L'Outil Carbone

Gestion des usages du bois récolté



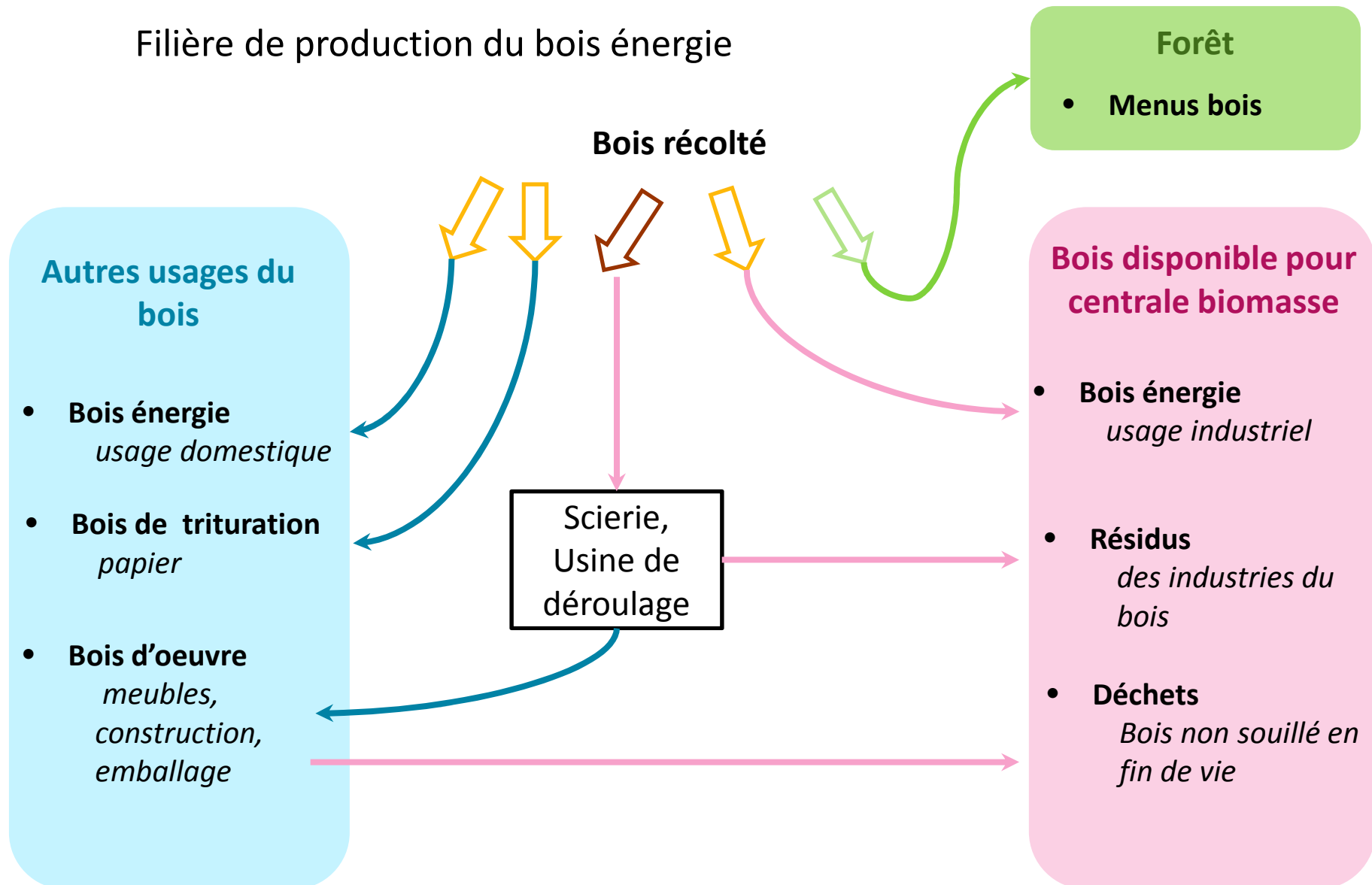
# L'Outil Carbone

Gestion des usages du bois récolté



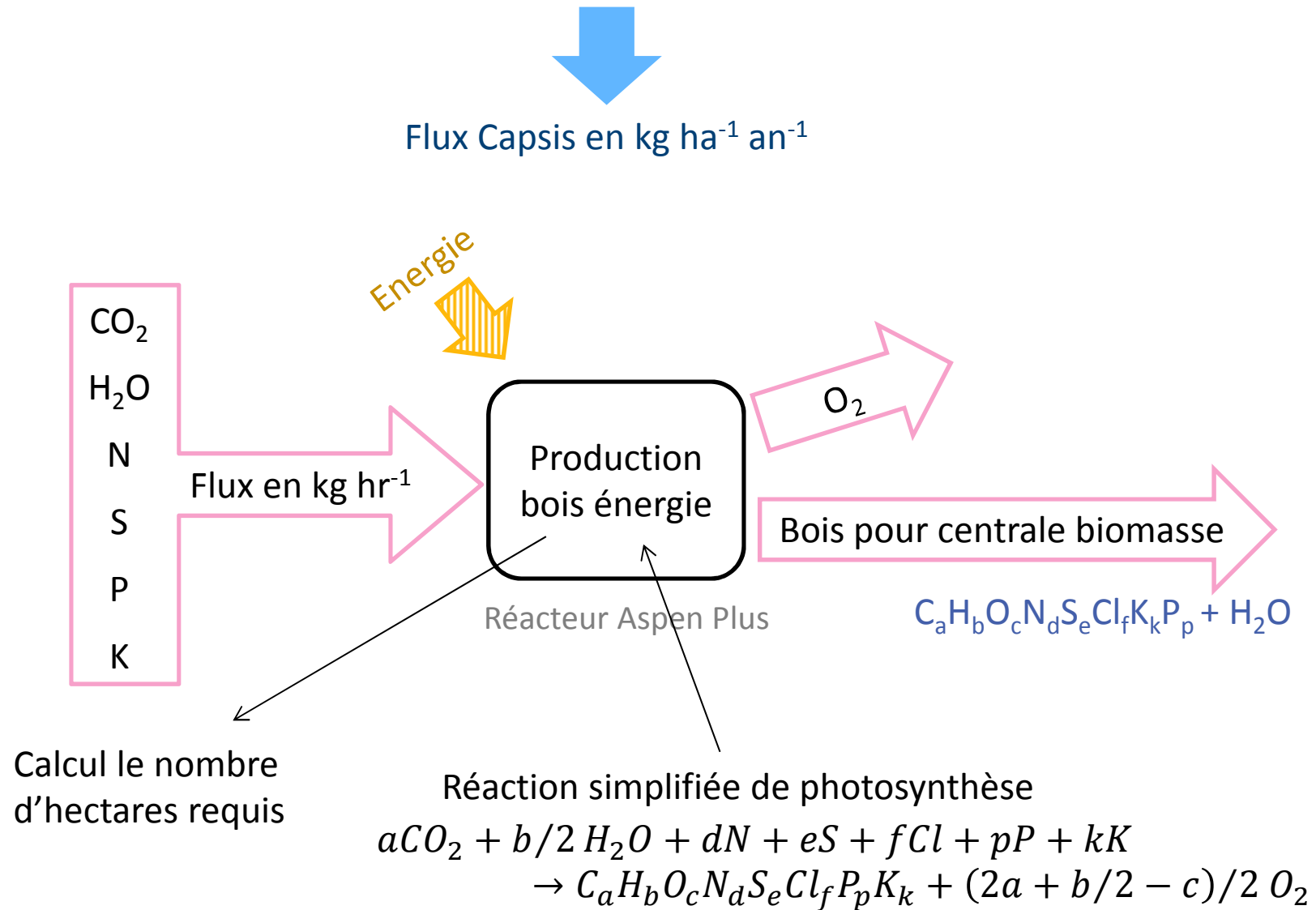
# L'Outil Carbone

Filière de production du bois énergie



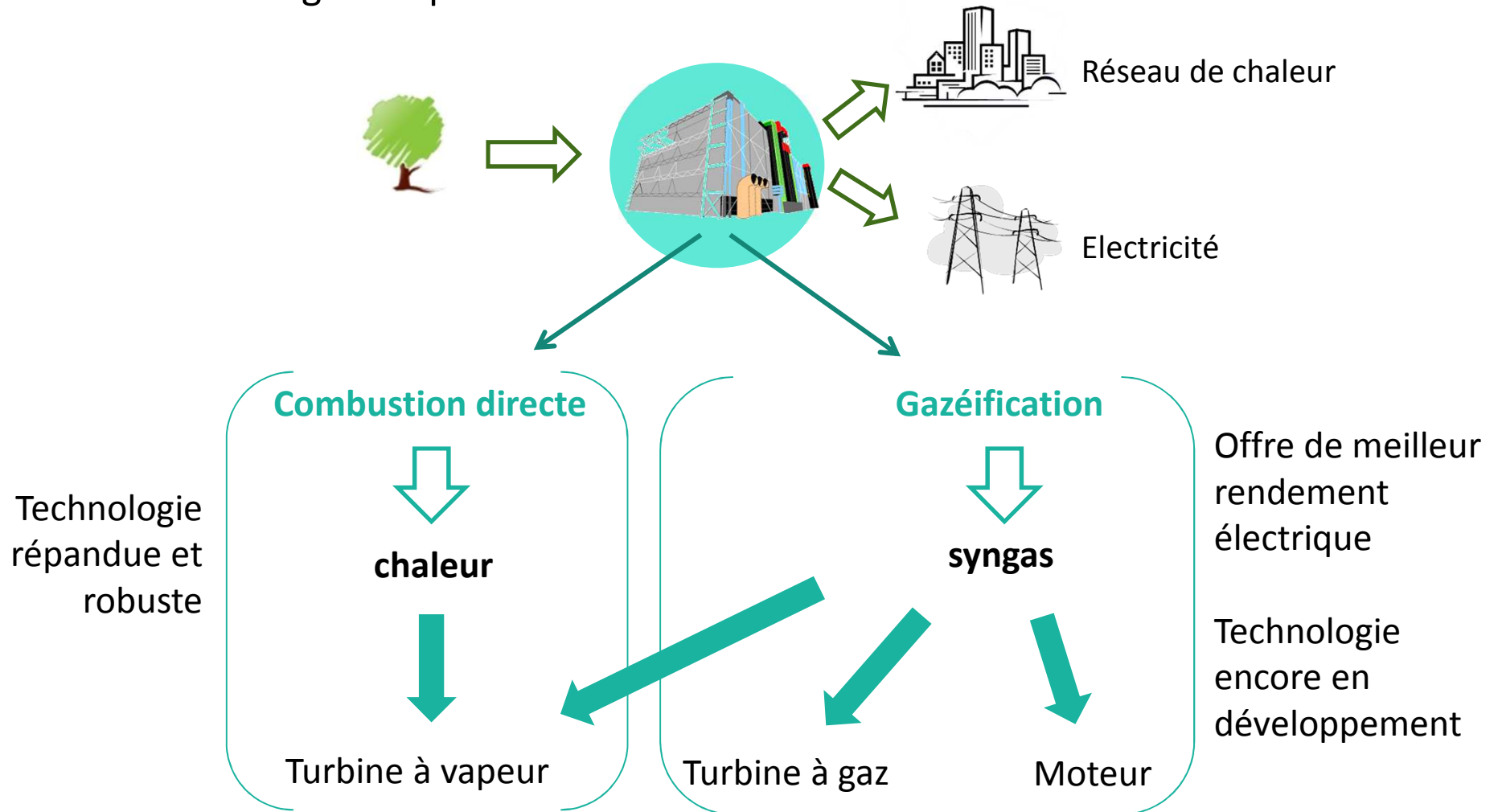


« Procédé » de production de bois énergie



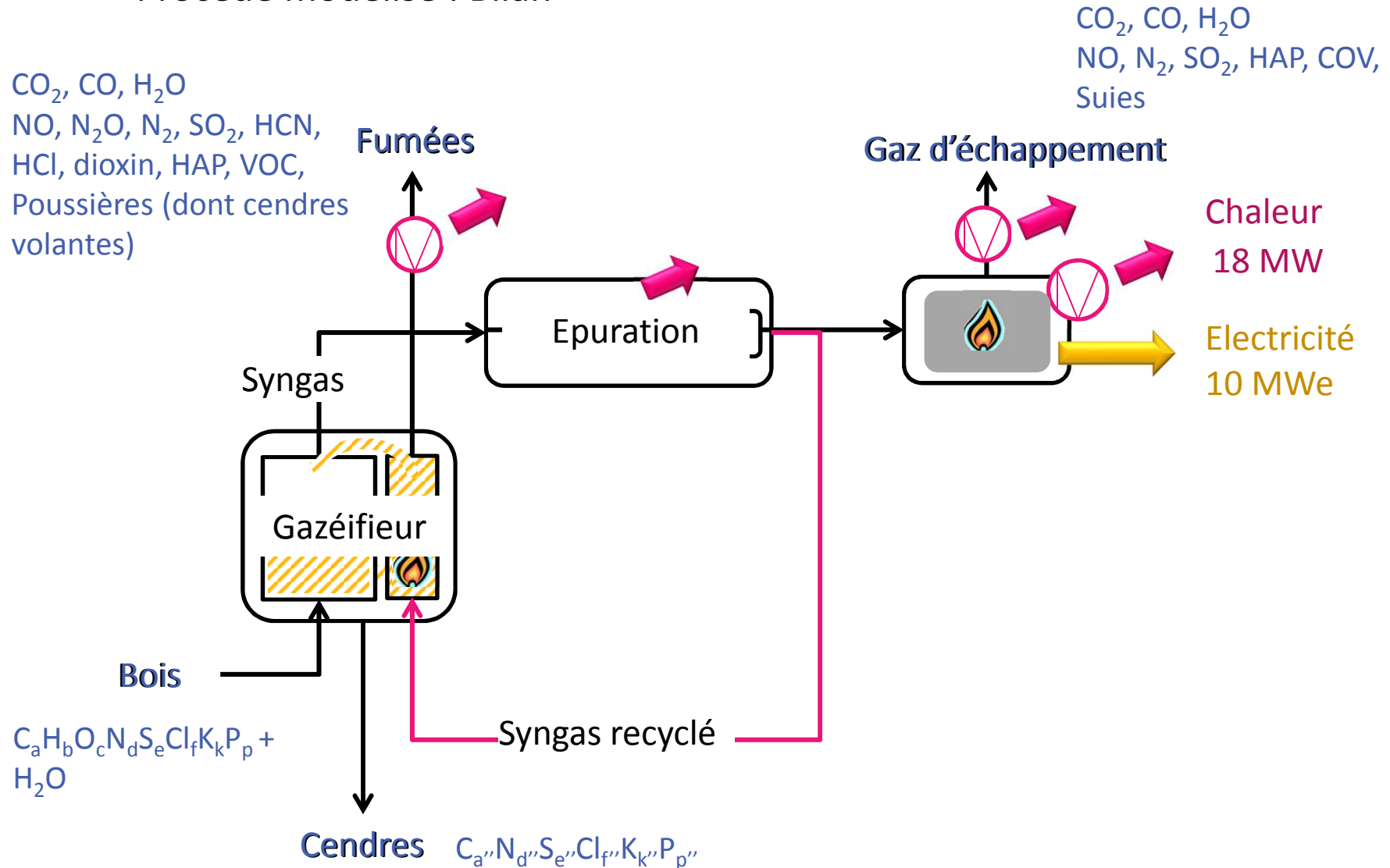
# Centrale de cogénération biomasse

Technologies disponibles



# Cogénération par gazéification

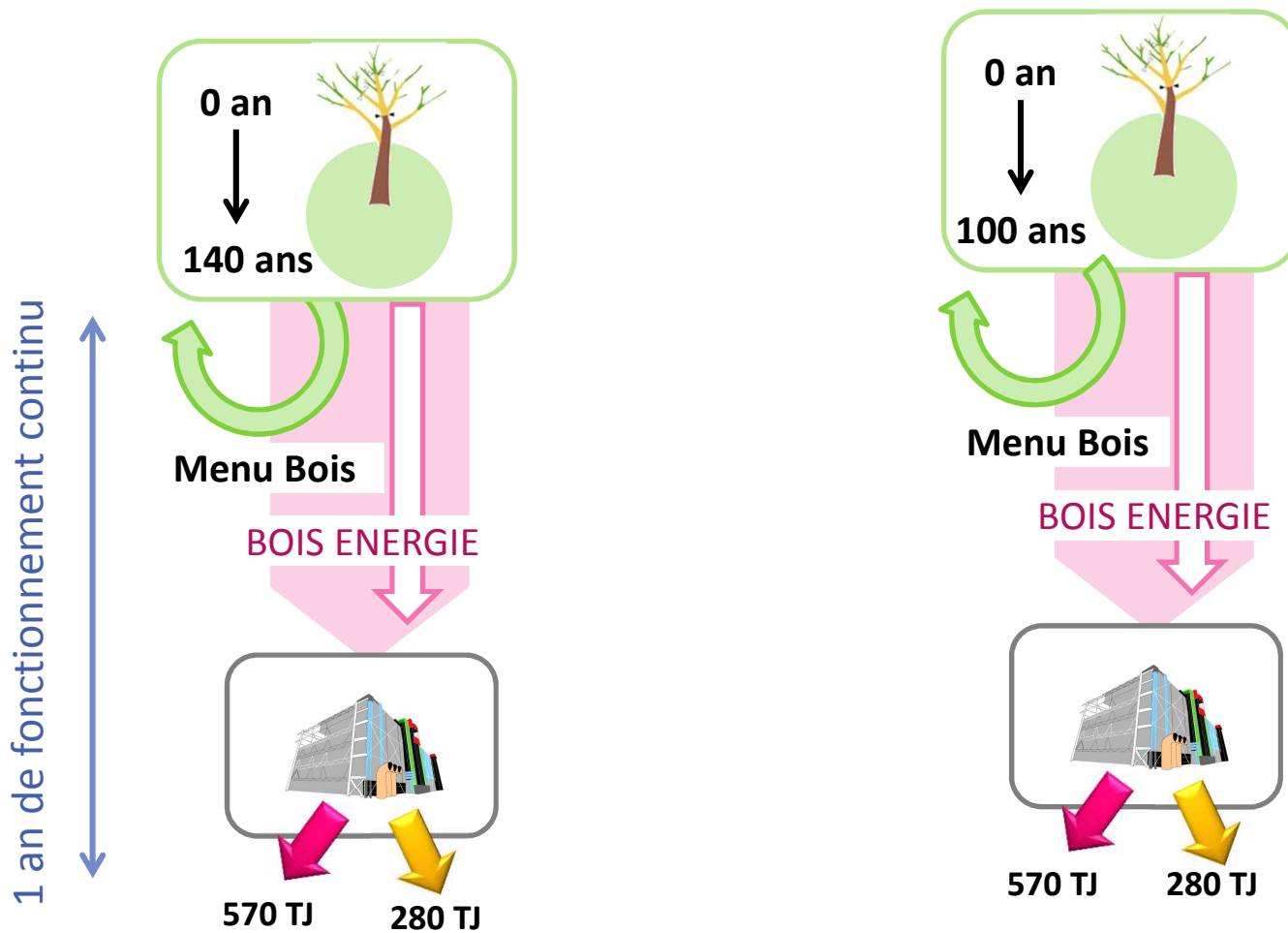
Procédé modélisé : ~~Bilan~~ Bilan d'ensemble



# Cas d'étude

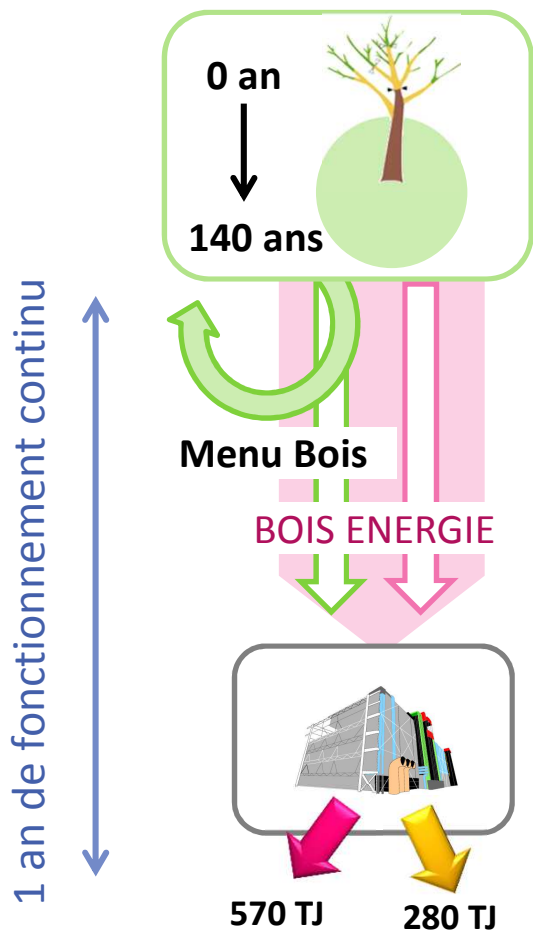
1 Gestion standard et menus bois laissé au sol

3 Gestion plus intensive et menus bois laissé au sol

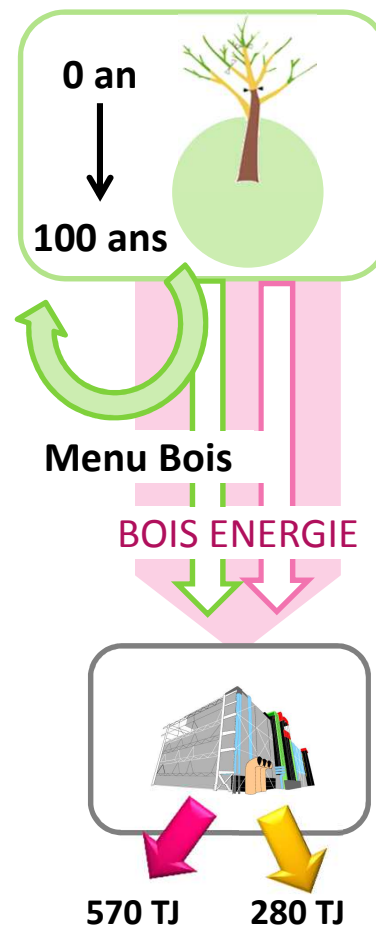


# Cas d'étude

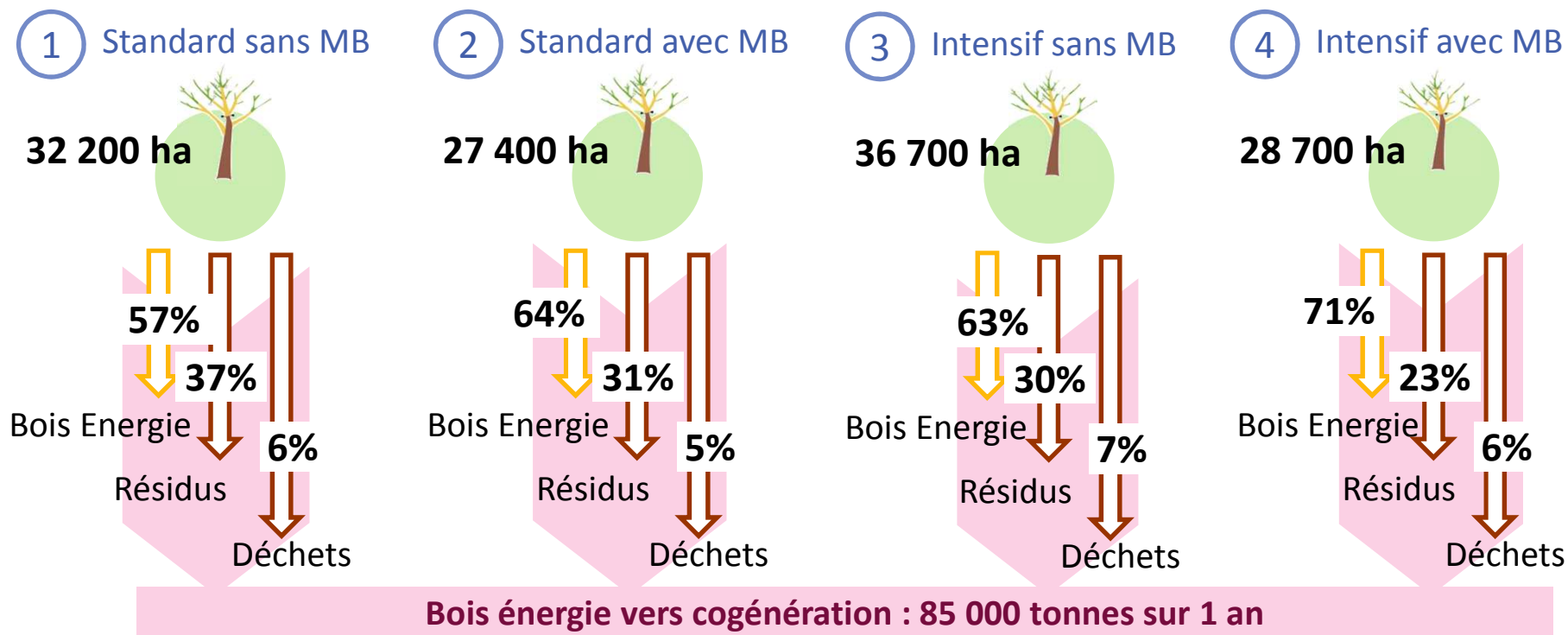
2 Gestion standard et menus bois utilisé comme bois énergie



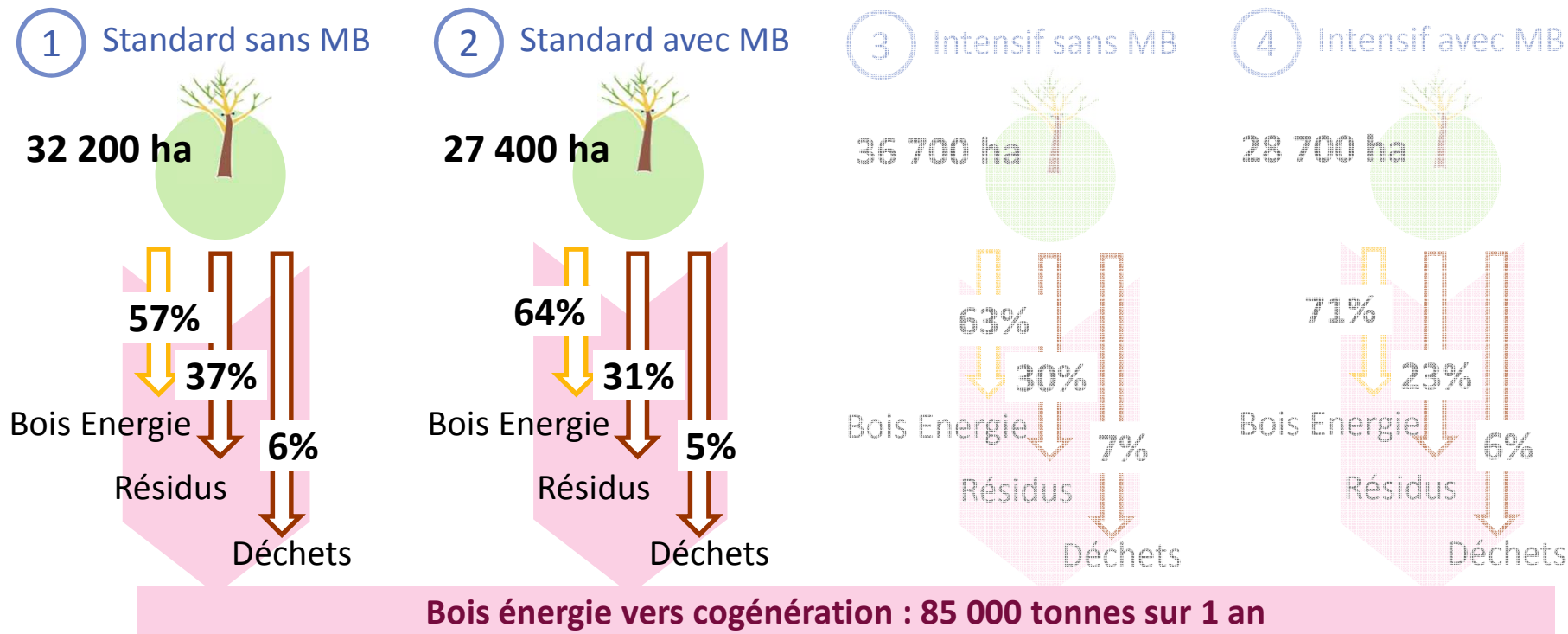
4 Gestion plus intensive et menus bois utilisé comme bois énergie



# Influence des scénarios sur la production de bois énergie



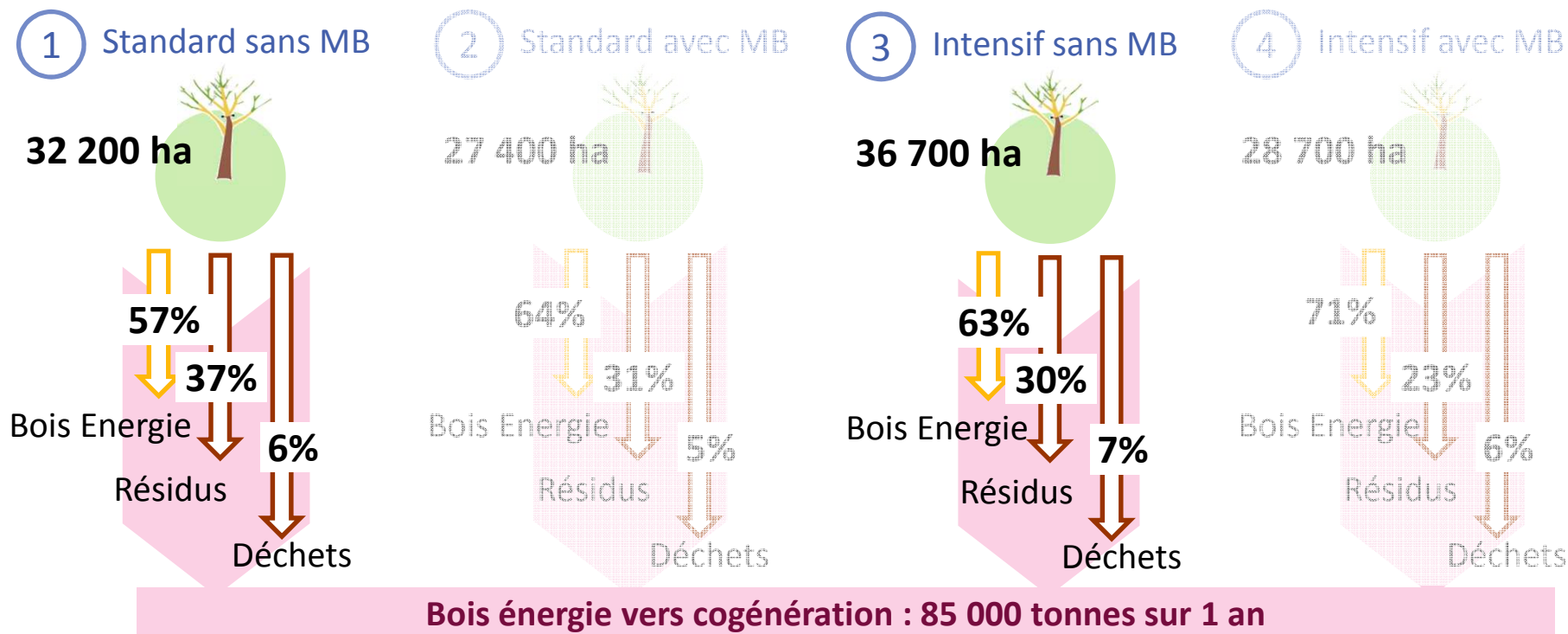
# Influence des scénarios sur la production de bois énergie



## Récolte des menus bois

- nombre hectares requis : 15%
- bois énergie forêt : 7% ➡ moins de biomasse /ha  
moins de bois d'œuvre

# Influence des scénarios sur la production de bois énergie



*Durée de rotation plus courte*

- ↗ nombre hectares requis : 14%
- ↗ bois énergie forêt : 6%
- ↘ résidus industrie : 7%

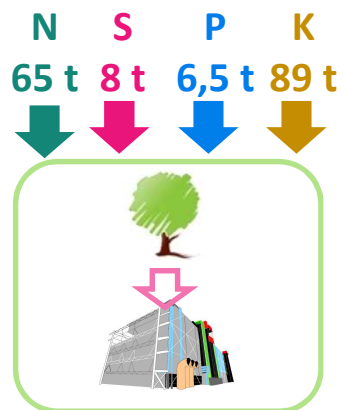


moins de biomasse /ha  
moins de bois d'œuvre

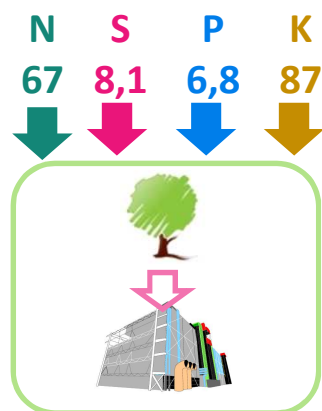


# Influence des scénarios sur l'exportation des minéraux

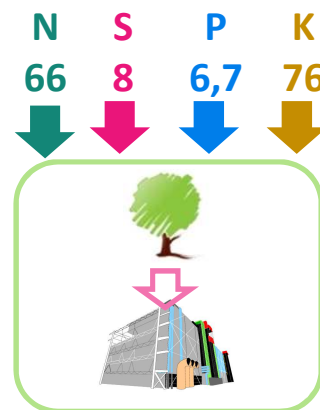
1 Standard sans MB



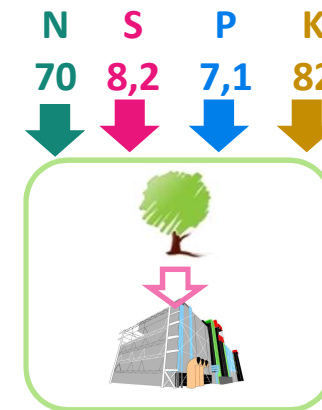
2 Standard avec MB



3 Intensif sans MB

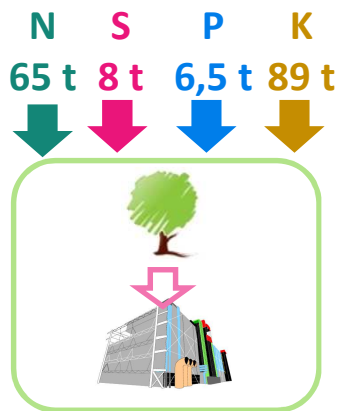


4 Intensif avec MB

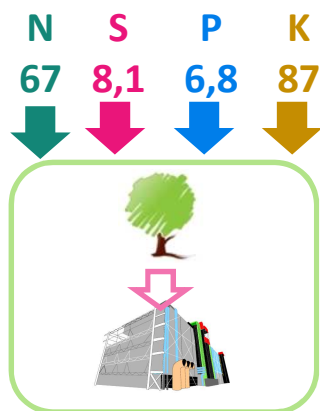


# Influence des scénarios sur l'exportation des minéraux

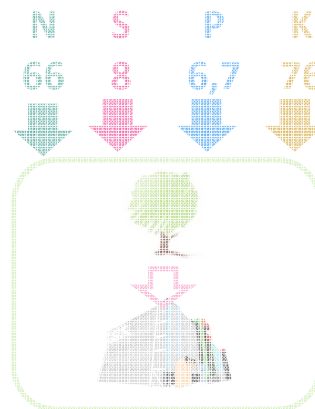
1 Standard sans MB



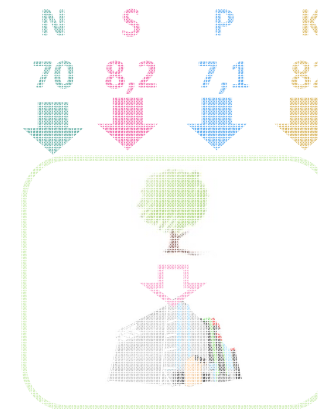
2 Standard avec MB



3 Intensif sans MB



4 Intensif avec MB



## Récolte des menus bois

- ↗ faible de N, S, P : + 1-5%
- ↘ de K : - 2%

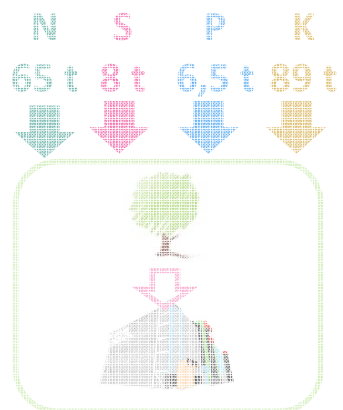


- $[N]_{\text{menu bois}} > [N]_{\text{autres}}$
- $[S]_{\text{menu bois}} > [S]_{\text{autres}}$
- $[P]_{\text{menu bois}} > [P]_{\text{autres}}$
- $[K]_{\text{menu bois}} < [K]_{\text{autres}}$

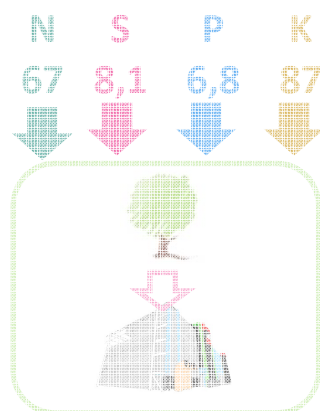
Migration du K des menus bois vers le tronc ?

# Influence des scénarios sur l'exportation des minéraux

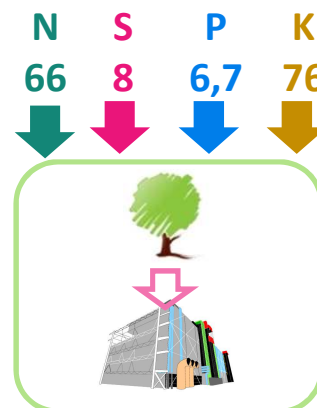
1 Standard sans MB



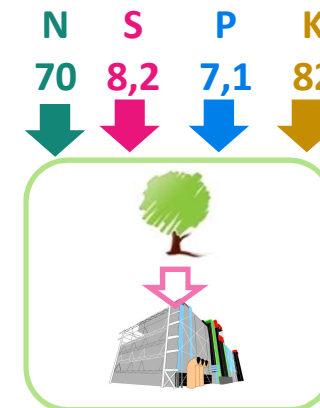
2 Standard avec MB



3 Intensif sans MB



4 Intensif avec MB



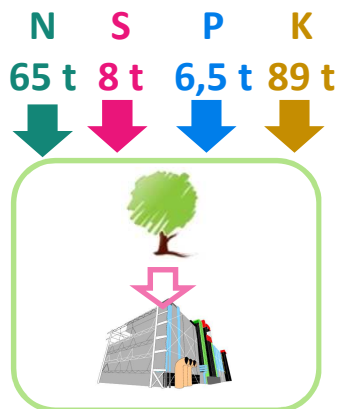
## Récolte des menus bois

- faible de N, S, P : + 2-6%
- de K : + 8%

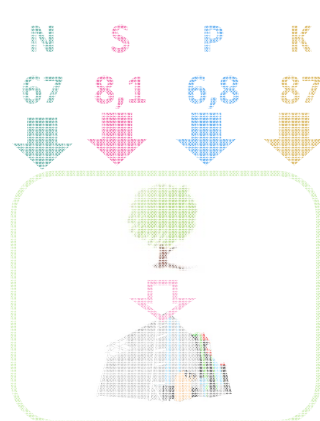
⇒ •  $[K]_{\text{menu bois}} > [K]_{\text{autres}}$

# Influence des scénarios sur l'exportation des minéraux

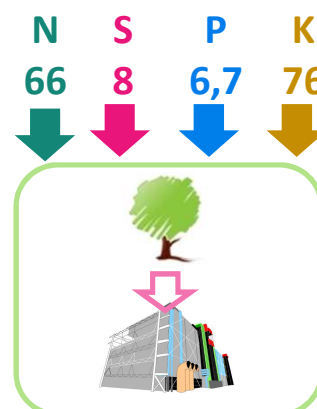
1 Standard sans MB



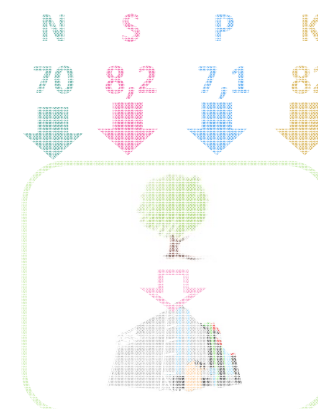
2 Standard avec MB



3 Intensif sans MB



4 Intensif avec MB



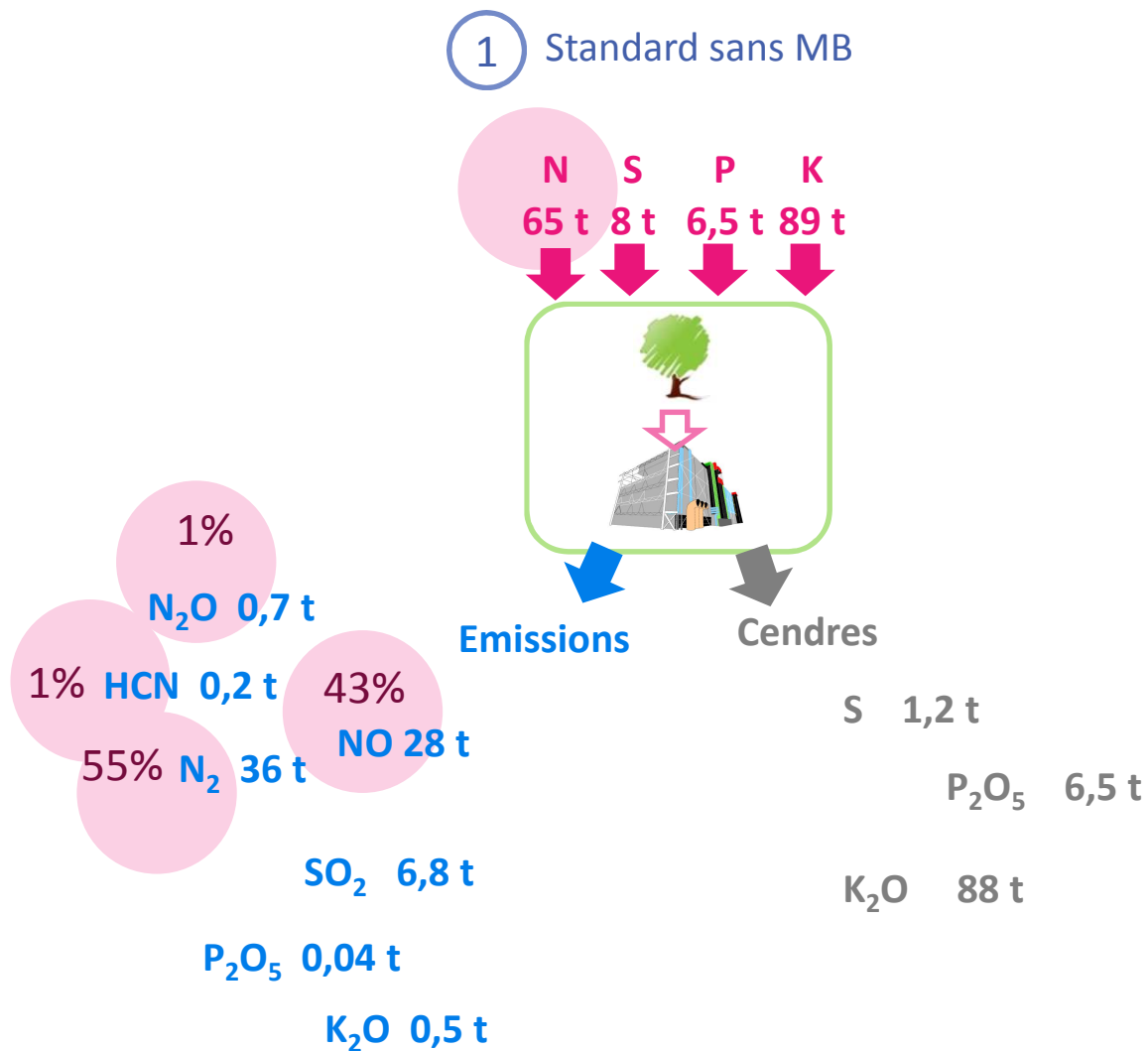
*Durée de rotation plus courte*

- faible en N et P : 1-3%
- en K : 15%
- = en S



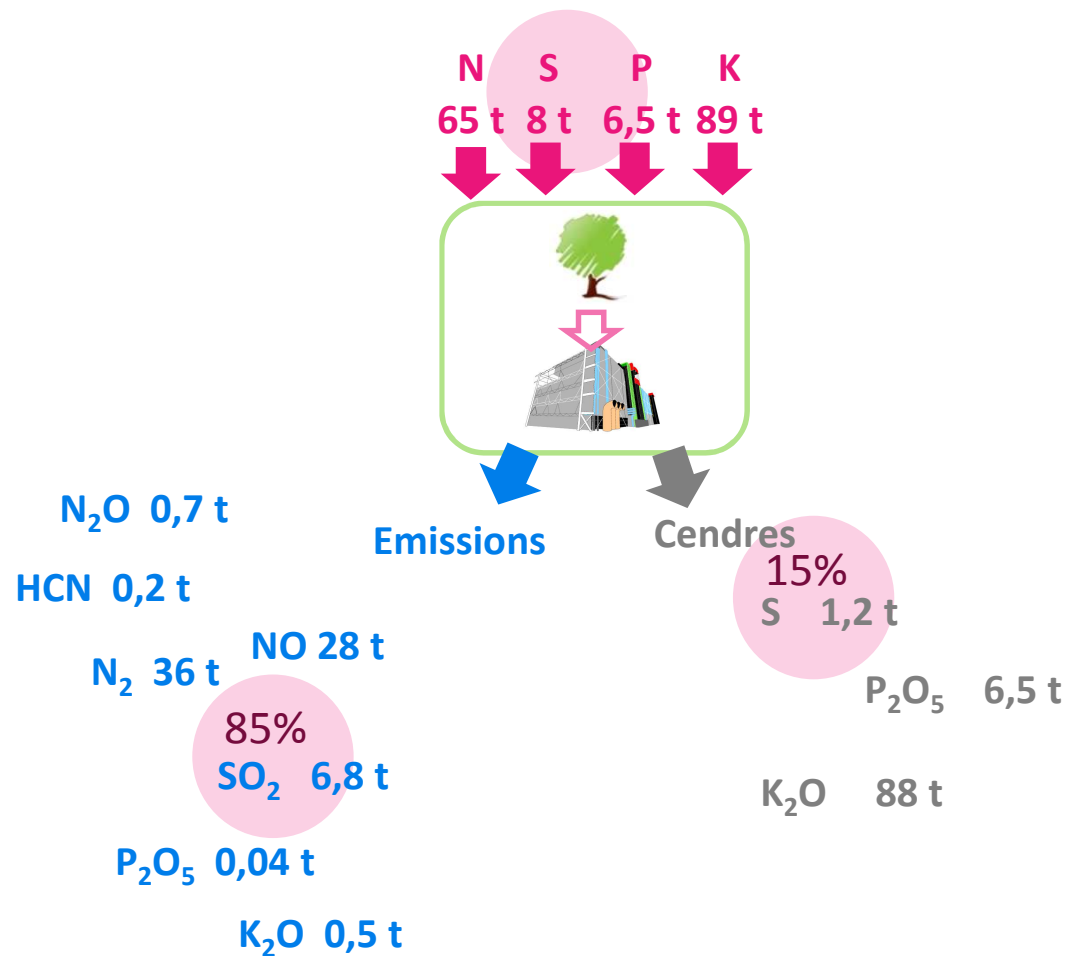
- $[N]_{\text{bois-energie-foret}} > [N]_{\text{autres}}$
- $[S]_{\text{bois-energie-foret}} > [S]_{\text{autres}}$
- $[P]_{\text{bois-energie-foret}} > [P]_{\text{autres}}$
- $[K]_{\text{bois-energie-foret}} < [K]_{\text{autres}}$
- + de bois-énergie-forêt

# Lien entre minéraux et émissions



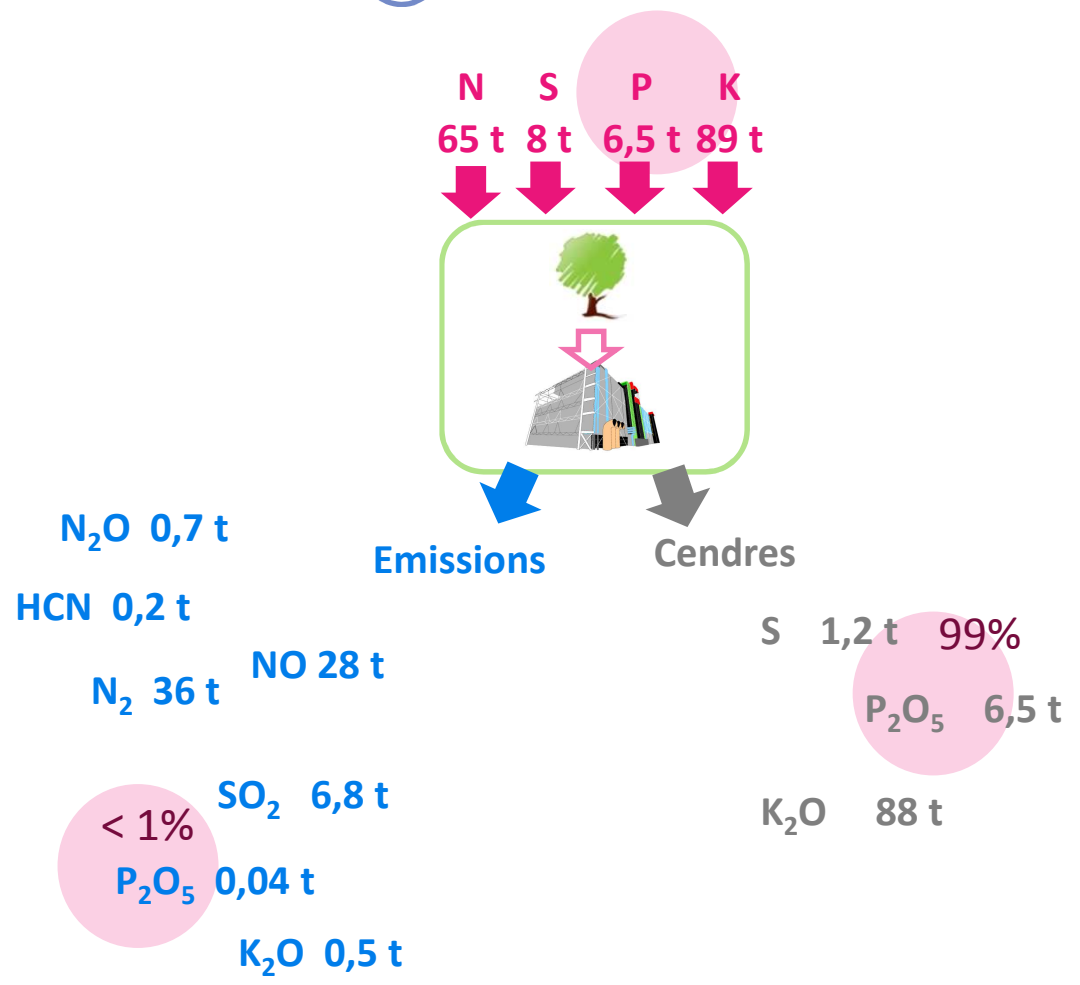
# Lien entre minéraux et émissions

1 Standard sans MB



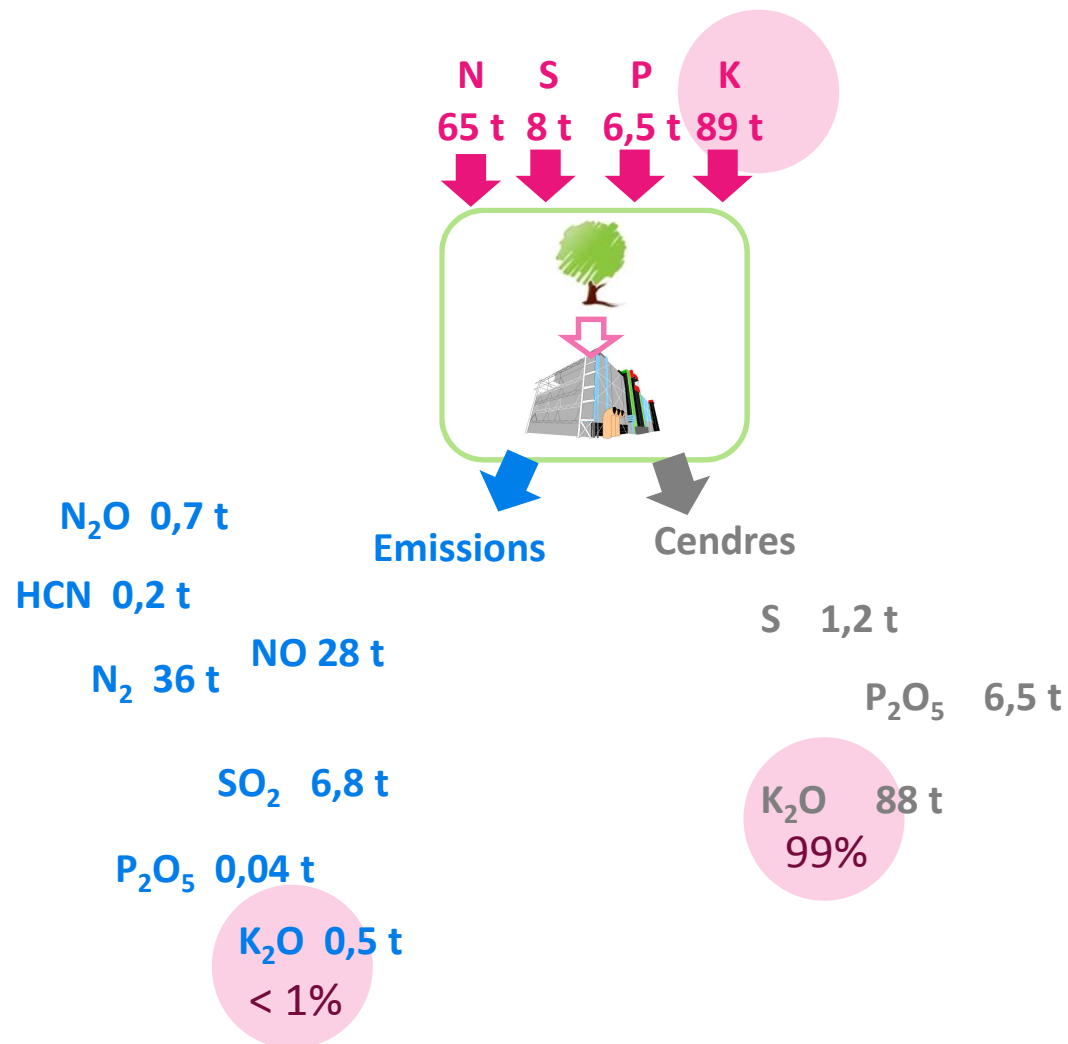
# Lien entre minéraux et émissions

① Standard sans MB



# Lien entre minéraux et émissions

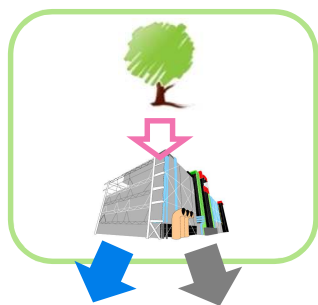
1 Standard sans MB





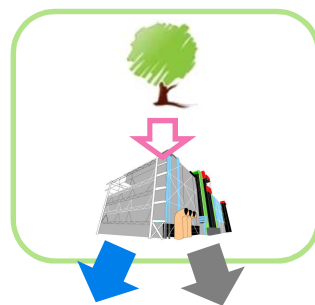
# Influence des scénarios sur les émissions

1 Standard sans MB



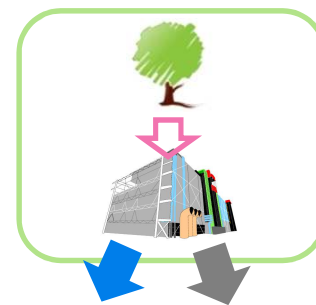
NO	28,0 t	Cendres	
		S	1,2 t
N <sub>2</sub> O	0,7 t	P <sub>2</sub> O <sub>5</sub>	6,5 t
SO <sub>2</sub>	6,8 t	K <sub>2</sub> O	88 t

2 Standard avec MB



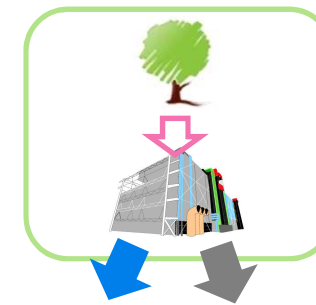
NO	28,2	Cendres	
		S	1,2
N <sub>2</sub> O	0,8	P <sub>2</sub> O <sub>5</sub>	6,8
SO <sub>2</sub>	6,9	K <sub>2</sub> O	87

3 Intensif sans MB



NO	28,1	Cendres	
		S	1,2
N <sub>2</sub> O	0,75	P <sub>2</sub> O <sub>5</sub>	6,6
SO <sub>2</sub>	6,8	K <sub>2</sub> O	76

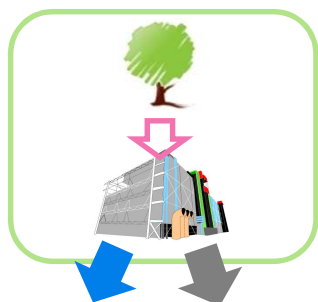
4 Intensif avec MB



NO	28,4	Cendres	
		S	1,2
N <sub>2</sub> O	0,8	P <sub>2</sub> O <sub>5</sub>	7
SO <sub>2</sub>	6,9	K <sub>2</sub> O	76

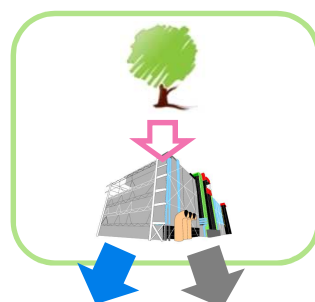
# Influence des scénarios sur les émissions

1 Standard sans MB



NO	28,0 t	Cendres	
		S	1,2 t
N <sub>2</sub> O	0,7 t	P <sub>2</sub> O <sub>5</sub>	6,5 t
SO <sub>2</sub>	6,8 t	K <sub>2</sub> O	88 t

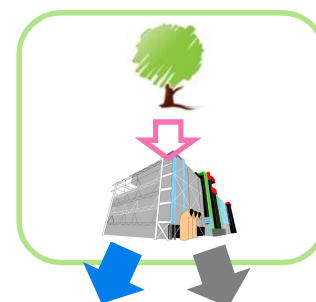
2 Standard avec MB



NO	28,2	Cendres	
		S	1,2
N <sub>2</sub> O	0,8	P <sub>2</sub> O <sub>5</sub>	6,8
SO <sub>2</sub>	6,9	K <sub>2</sub> O	87



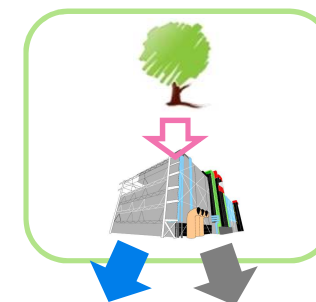
3 Intensif sans MB



NO	28,1	Cendres	
		S	1,2
N <sub>2</sub> O	0,75	P <sub>2</sub> O <sub>5</sub>	6,6
SO <sub>2</sub>	6,8	K <sub>2</sub> O	76



4 Intensif avec MB



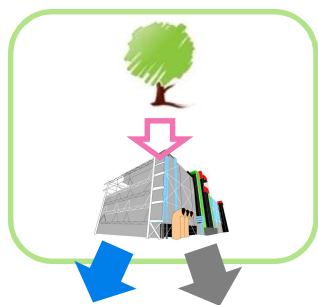
NO	28,4	Cendres	
		S	1,2
N <sub>2</sub> O	0,8	P <sub>2</sub> O <sub>5</sub>	7
SO <sub>2</sub>	6,9	K <sub>2</sub> O	76



↗ avec récolte des menus bois et rotation plus courte  
 <=> exportation des minéraux

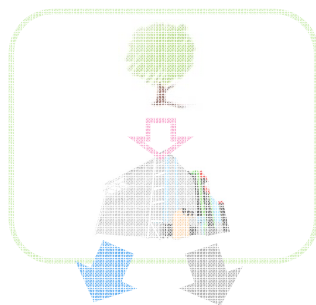
# Influence des scénarios sur les émissions

1 Standard sans MB



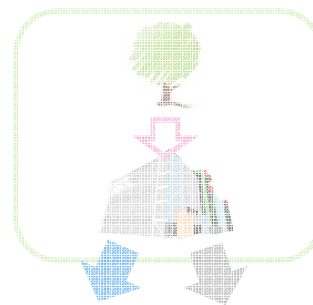
NO	28,0 t	Cendres	
		S	1,2 t
N <sub>2</sub> O	0,7 t	P <sub>2</sub> O <sub>5</sub>	6,5 t
SO <sub>2</sub>	6,8 t	K <sub>2</sub> O	88 t

2 Standard avec MB



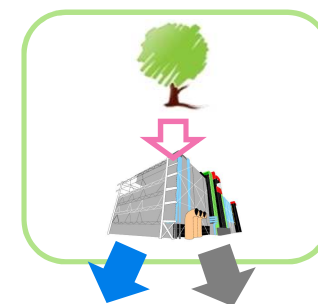
NO	28,2	Cendres	
		S	1,2
N <sub>2</sub> O	0,8	P <sub>2</sub> O <sub>5</sub>	6,8
SO <sub>2</sub>	6,9	K <sub>2</sub> O	87

3 Intensif sans MB



NO	28,1	Cendres	
		S	1,2
N <sub>2</sub> O	0,75	P <sub>2</sub> O <sub>5</sub>	6,6
SO <sub>2</sub>	6,8	K <sub>2</sub> O	76

4 Intensif avec MB

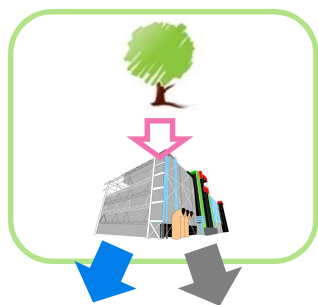


NO	28,4	Cendres	
		S	1,2
N <sub>2</sub> O	0,8	P <sub>2</sub> O <sub>5</sub>	7
SO <sub>2</sub>	6,9	K <sub>2</sub> O	76

- ➔ Récolte menu bois + rotation plus courte
- ↗ NO : + 400 kg ; N<sub>2</sub>O : + 54 kg ; SO<sub>2</sub> : + 150 kg
- +1%
+7%
+2%

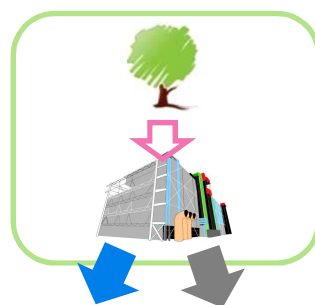
# Influence des scénarios sur les émissions

1 Standard sans MB



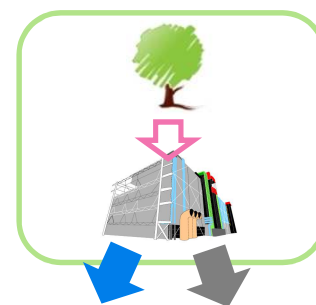
NO	28,0 t	Cendres	
		S	1,2 t
N <sub>2</sub> O	0,7 t	P <sub>2</sub> O <sub>5</sub>	6,5 t
SO <sub>2</sub>	6,8 t	K <sub>2</sub> O	88 t

2 Standard avec MB



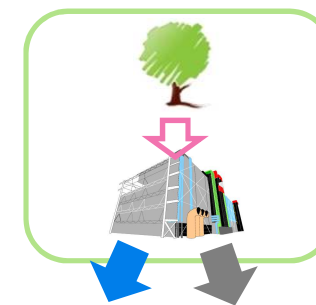
NO	28,2	Cendres	
		S	1,2
N <sub>2</sub> O	0,8	P <sub>2</sub> O <sub>5</sub>	6,8
SO <sub>2</sub>	6,9	K <sub>2</sub> O	87

3 Intensif sans MB



NO	28,1	Cendres	
		S	1,2
N <sub>2</sub> O	0,75	P <sub>2</sub> O <sub>5</sub>	6,6
SO <sub>2</sub>	6,8	K <sub>2</sub> O	76

4 Intensif avec MB



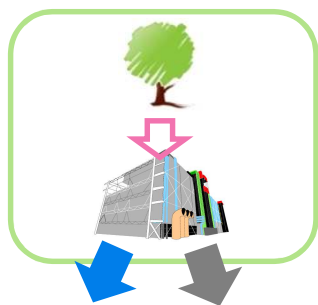
NO	28,4	Cendres	
		S	1,2
N <sub>2</sub> O	0,8	P <sub>2</sub> O <sub>5</sub>	7
SO <sub>2</sub>	6,9	K <sub>2</sub> O	76



↗ S et P dans les cendres et ↘ K

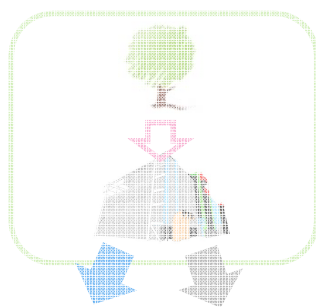
# Influence des scénarios sur les émissions

1 Standard sans MB



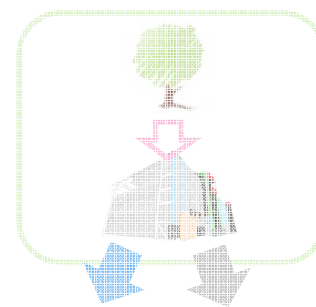
NO	28,0 t	Cendres	
		S	1,2 t
N <sub>2</sub> O	0,7 t	P <sub>2</sub> O <sub>5</sub>	6,5 t
SO <sub>2</sub>	6,8 t	K <sub>2</sub> O	88 t

2 Standard avec MB



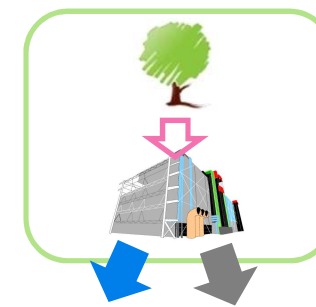
NO	28,2	Cendres	
		S	1,2
N <sub>2</sub> O	0,8	P <sub>2</sub> O <sub>5</sub>	6,8
SO <sub>2</sub>	6,9	K <sub>2</sub> O	87

3 Intensif sans MB



NO	28,1	Cendres	
		S	1,2
N <sub>2</sub> O	0,75	P <sub>2</sub> O <sub>5</sub>	6,6
SO <sub>2</sub>	6,8	K <sub>2</sub> O	76

4 Intensif avec MB



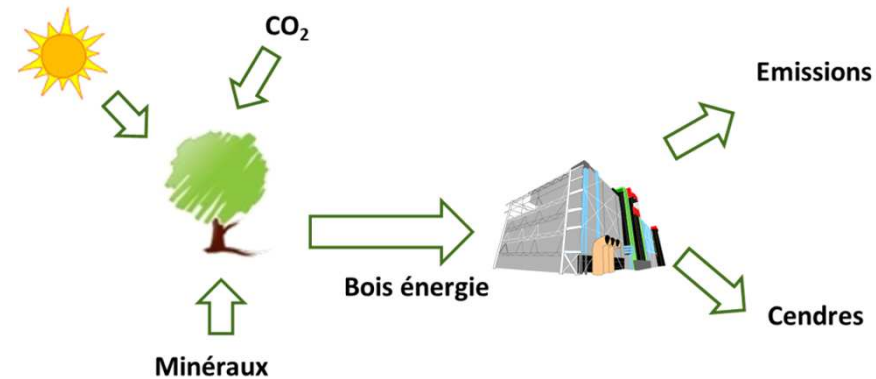
NO	28,4	Cendres	
		S	1,2
N <sub>2</sub> O	0,8	P <sub>2</sub> O <sub>5</sub>	7
SO <sub>2</sub>	6,9	K <sub>2</sub> O	76

⇒ Récolte menu bois + rotation plus courte

- ↗ S : + 30 kg ; P<sub>2</sub>O<sub>5</sub> : + 560 kg ; K<sub>2</sub>O : - 12 000 kg

+2%
+9%
-13%

- Couplage « modèle Forêt » avec « modèle Procédé biomasse énergie »



- Prédiction des flux biomasse et minéraux du sol aux émissions
- Influence des pratiques sylvicoles sur exportation des minéraux vers centrale biomasse

Récolte des menus bois  
+ rotation plus courte

↗ exportation de N, S, P de 1 à 9%  
↘ exportation de K de 2 à 15%

- Influence des pratiques sylvicoles sur émissions de la centrale

Récolte des menus bois  
+ rotation plus courte

↗ émissions du procédé de 1 à 7%

# Merci

Merci à  
Fédération Jacques Villermaux,  
LERFoB,  
CNRS,  
*pour leur soutien financier*

