



Changements climatiques : Les impacts des ruminants et quels leviers d'action ?

Yves Beckers

Elevage de Précision et Nutrition

Gembloux Agro-Bio Tech

Université de Liège

Belgique



Questions posées

- Quelles sont les causes des changements climatiques ?
- Quels sont les principaux gaz à effet de serre ?
- Quelles sont les activités qui rejettent des GES ?
- Quels sont les GES rejetés par le secteur agricole ?
- Pourquoi les ruminants émettent-ils du méthane ?
- Quelle est l'origine du méthane ?
- Peut-on diminuer l'émission de méthane par le ruminant ?



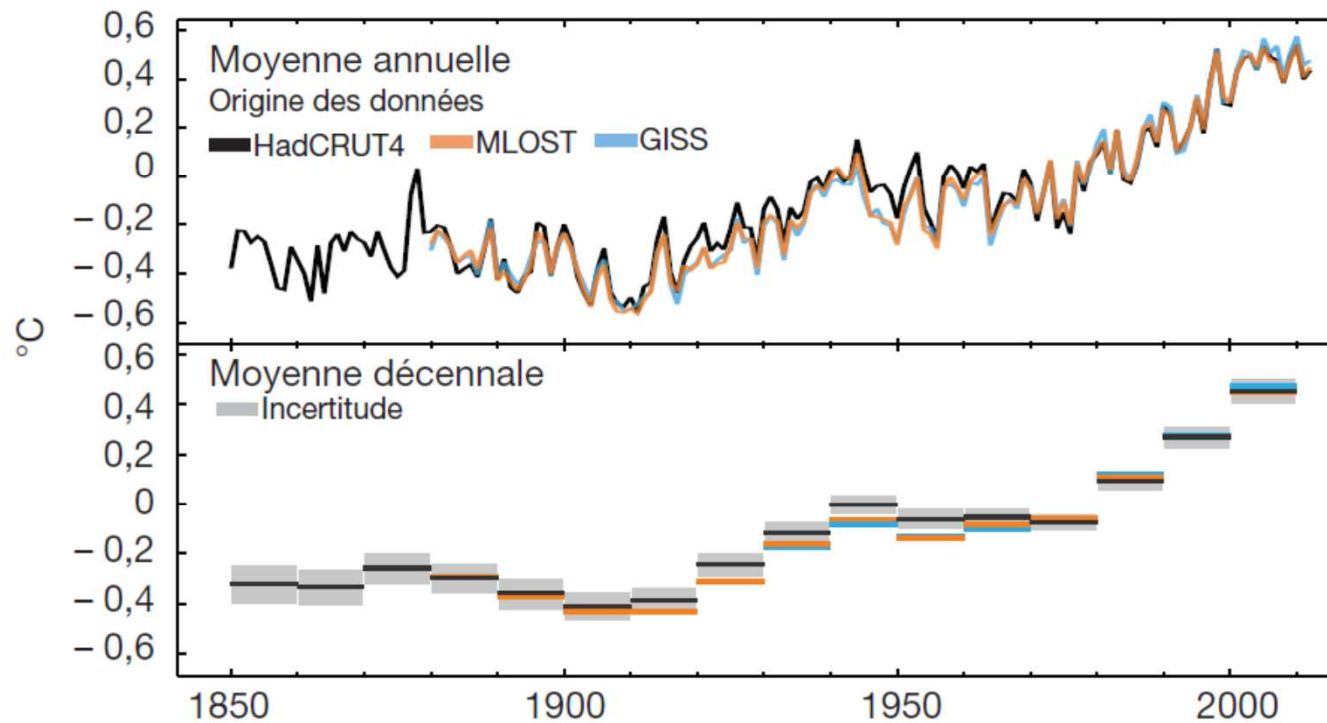
Introduction

Les changements climatiques sont les
conséquences du réchauffement climatique

Cause humaine : les gaz à effet de serre

Réchauffement climatique

Évolution des températures globales moyennes de 1850 à 2012
par rapport à la période de référence 1961-1990

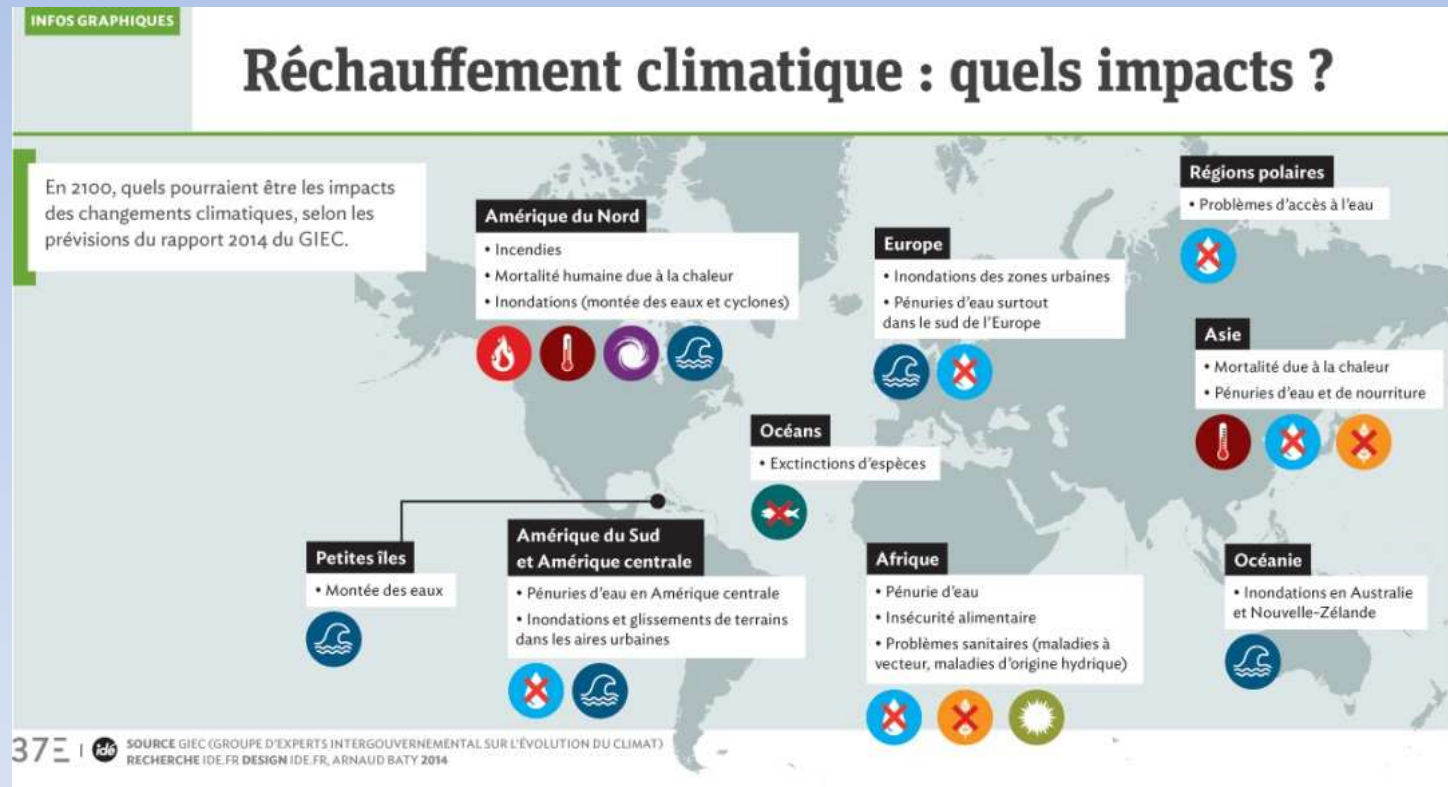


Source : Giec, 1^{er} groupe de travail, 2013

Changements climatiques



<http://verts-saint-orens.blogspot.be/>

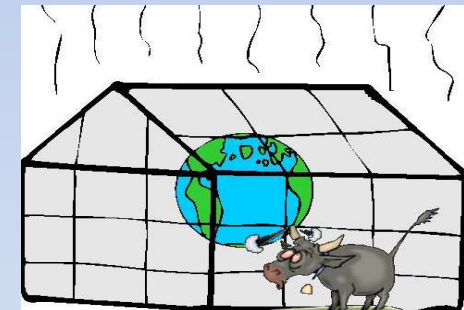


Gaz à effet de serre (GES)

- Changements climatiques
 - Emissions de GES d'origines anthropiques
 - Autres causes ?
- Activités d'élevage
 - Sources importantes
- Volonté de réduire les émissions
 - Quelles possibilités pour les activités d'élevage ?



<http://cret.blogspot.com/archive/2013/01/12/le-rechauffement-climatique-a-du-plomb-dans-l-air.html>



<http://oh-la-vache.blog.jeuxvideo.com/image/1205194185-jpg/>



<http://www.developpement-durable-lavenir.com/2005/08/06/logo-save-our-climate>

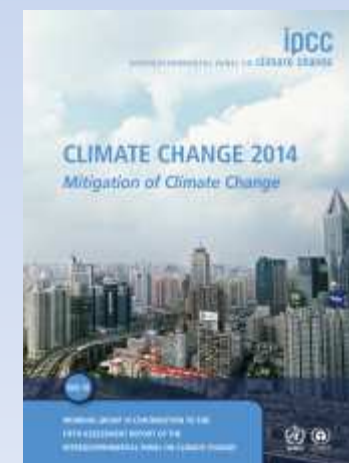
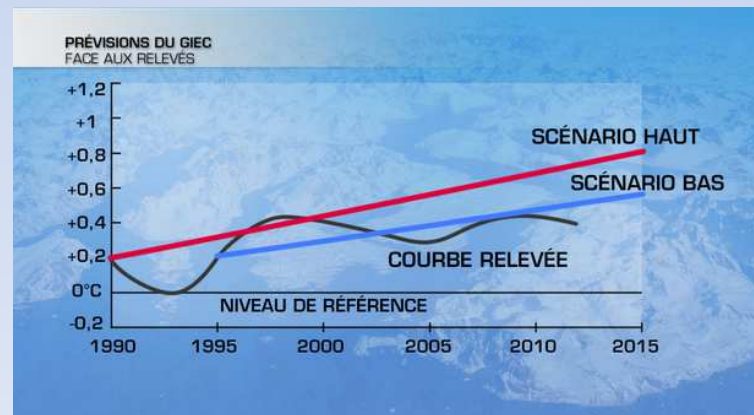


Changements climatiques – Sujet d’actualité et de polémique

- COP 21 – Paris 2015



<https://www.ipcc.ch/>

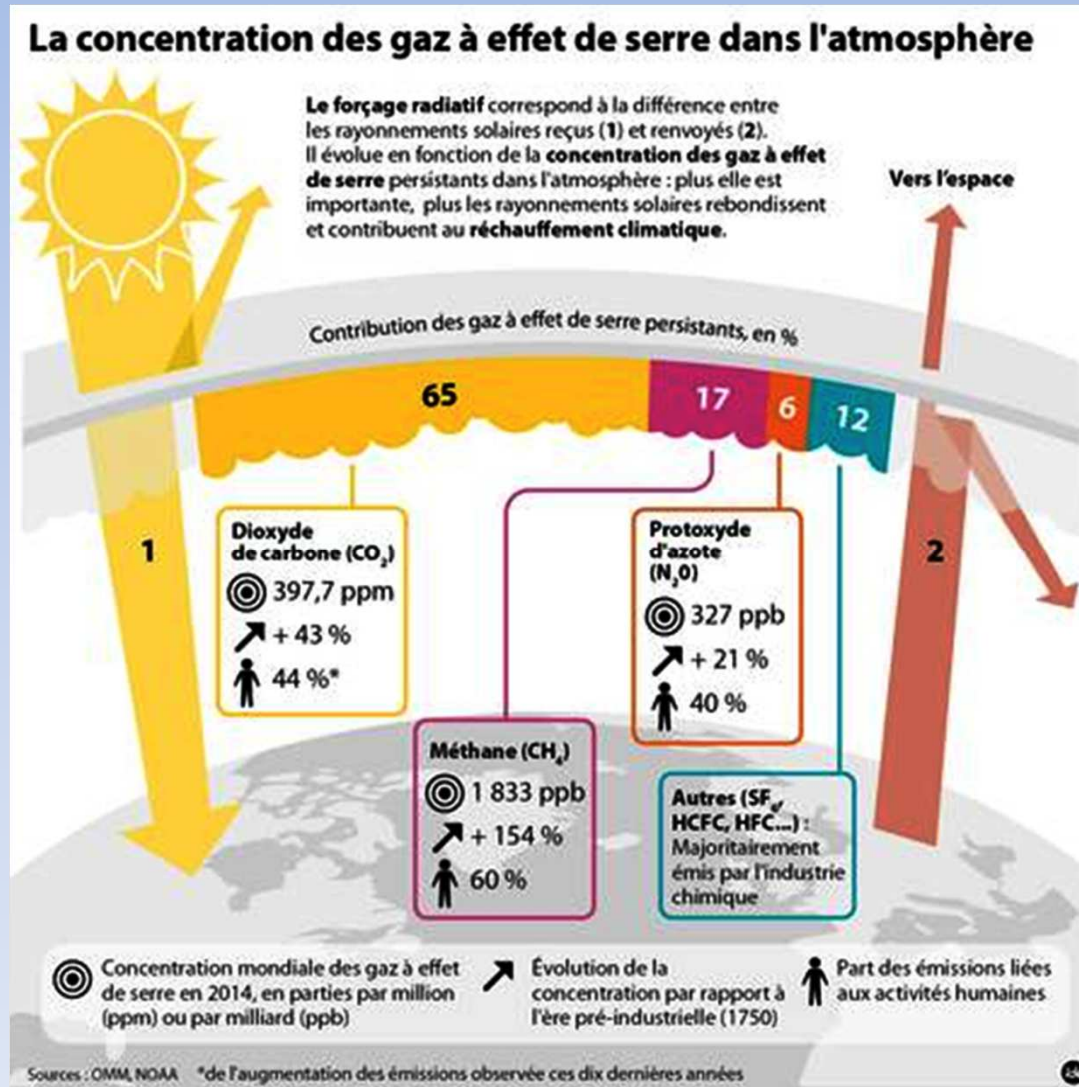




Emissions de GES

Secteur de l'élevage émet de 8 à 18 %
des GES totaux selon les sources

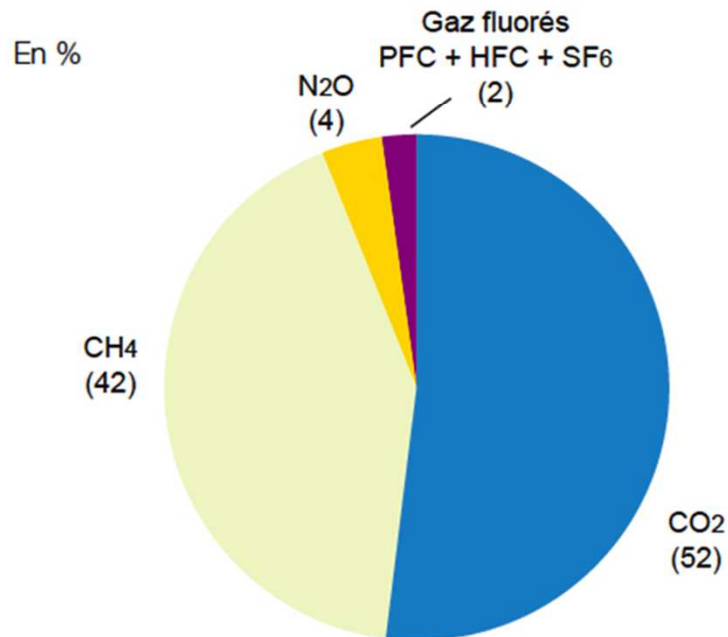
Emissions de GES



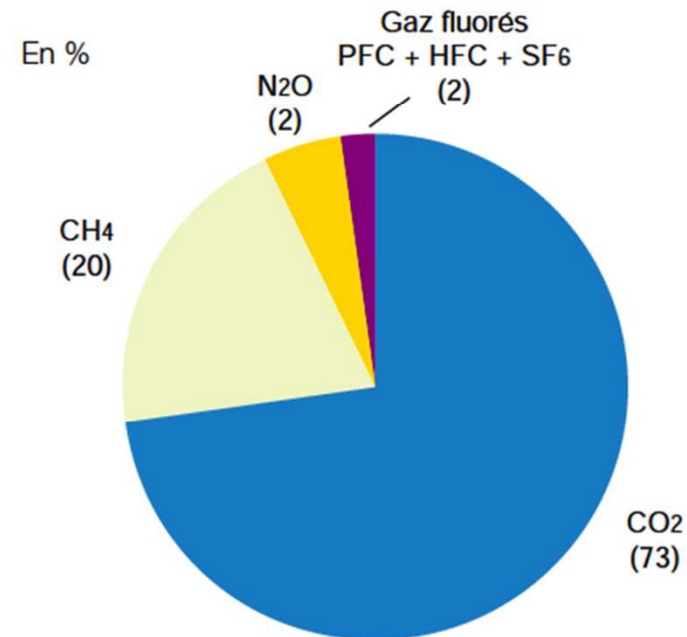
Types de GES

Répartition des émissions mondiale de GES¹ par gaz en 2010

Selon le potentiel de réchauffement global² à **20 ans**



Selon le potentiel de réchauffement global² à **100 ans**

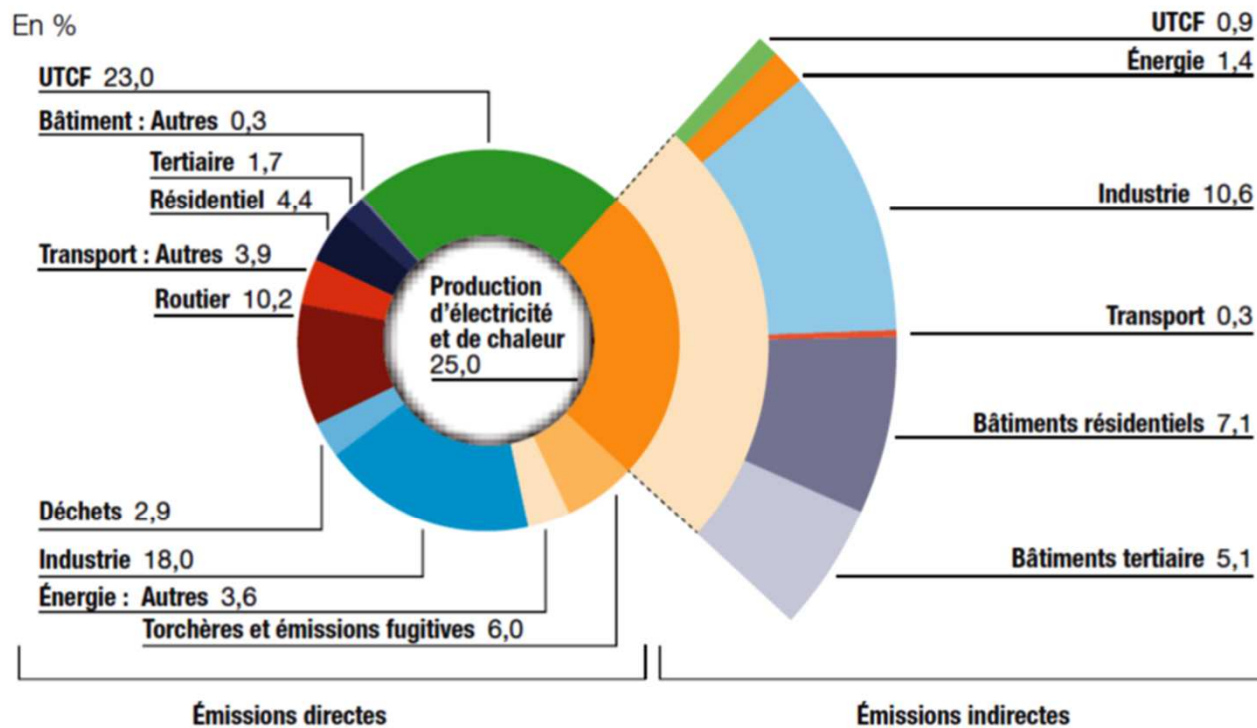


Source : Giec, 3^e groupe de travail, 2014

Origines des GES

Répartition des émissions mondiales de GES par secteur en 2010

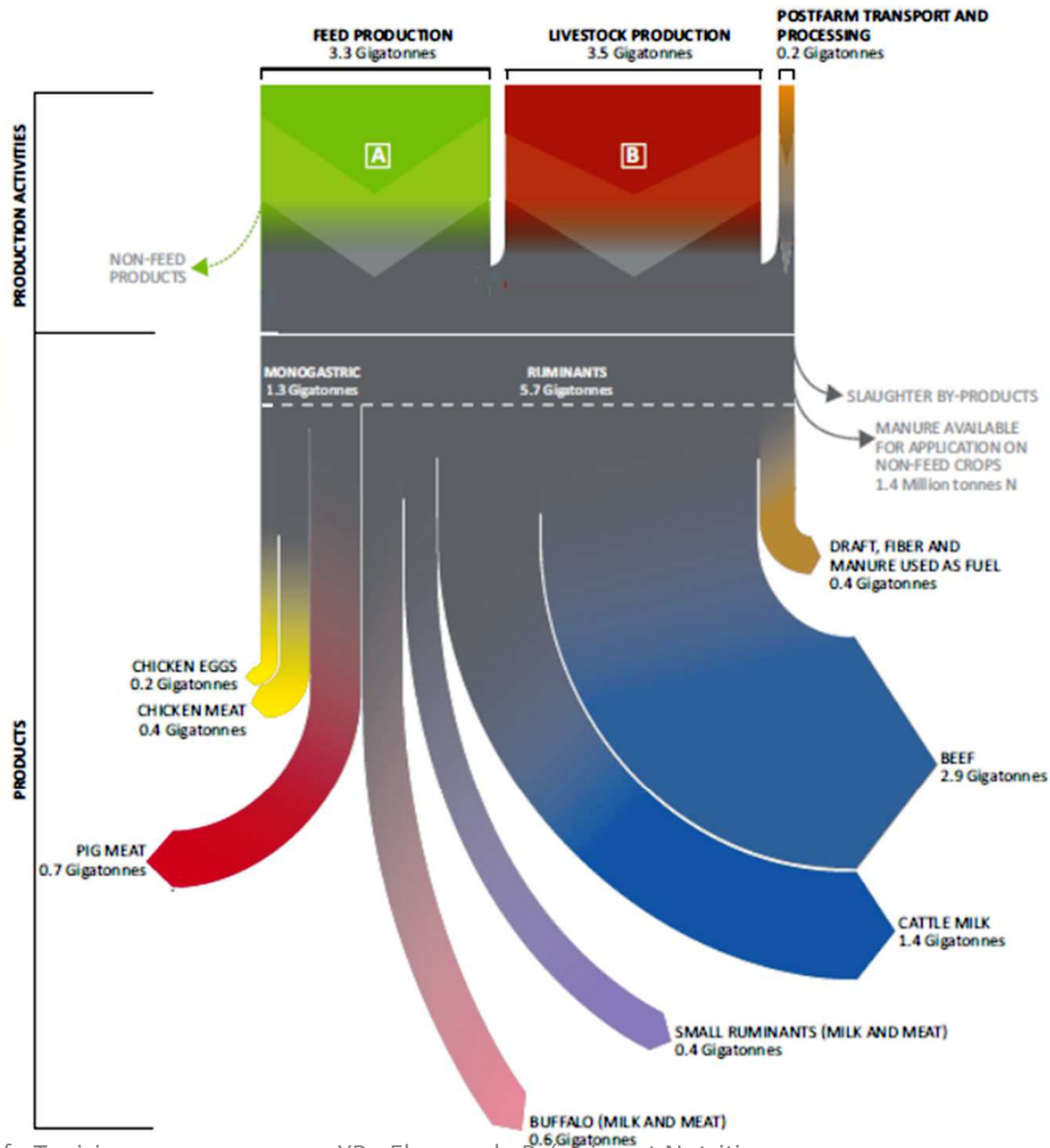
En %



Les émissions indirectes correspondent aux émissions des secteurs liées à leur consommation d'électricité et de chaleur.

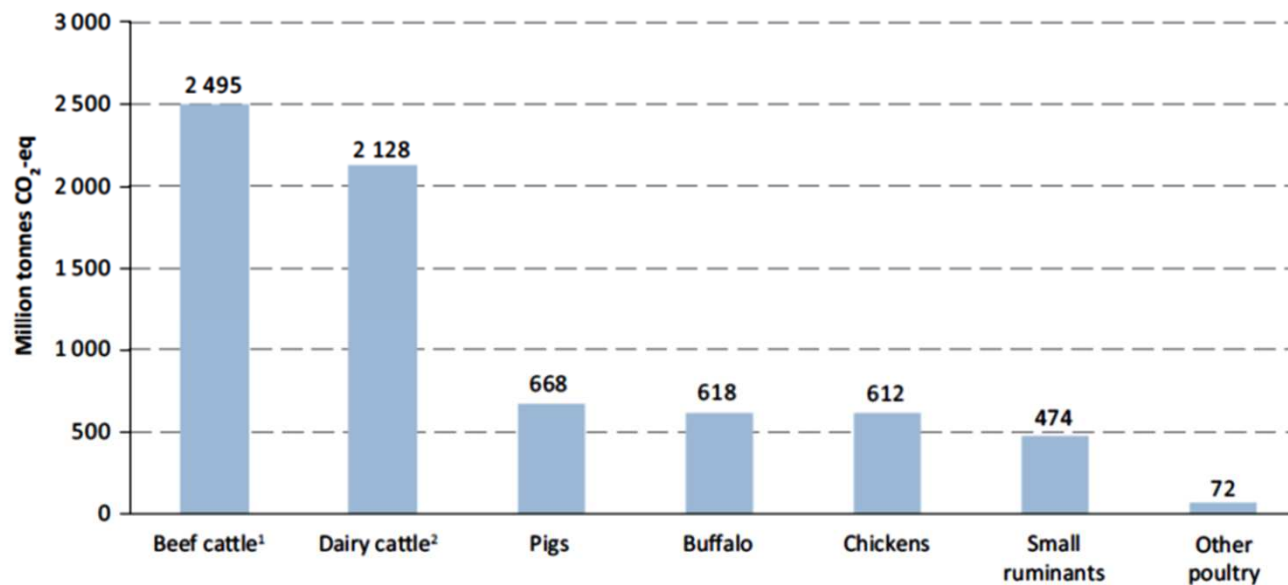
Source : Giec, 3^e groupe de travail, 2014

FIGURE 5. GHG emissions from global livestock supply chains, by production activities and products



Emissions de GES par espèces

FIGURE 2. Global estimates of emissions by species*



*Includes emissions attributed to edible products and to other goods and services, such as draught power and wool.

¹ Producing meat and non-edible outputs.

² Producing milk and meat as well as non-edible outputs.

Source: GLEAM.



GES - Agriculture

Leviers pour diminuer les émissions :
prendre en considération les sources
et les puits du système agricole

Ges - agriculture

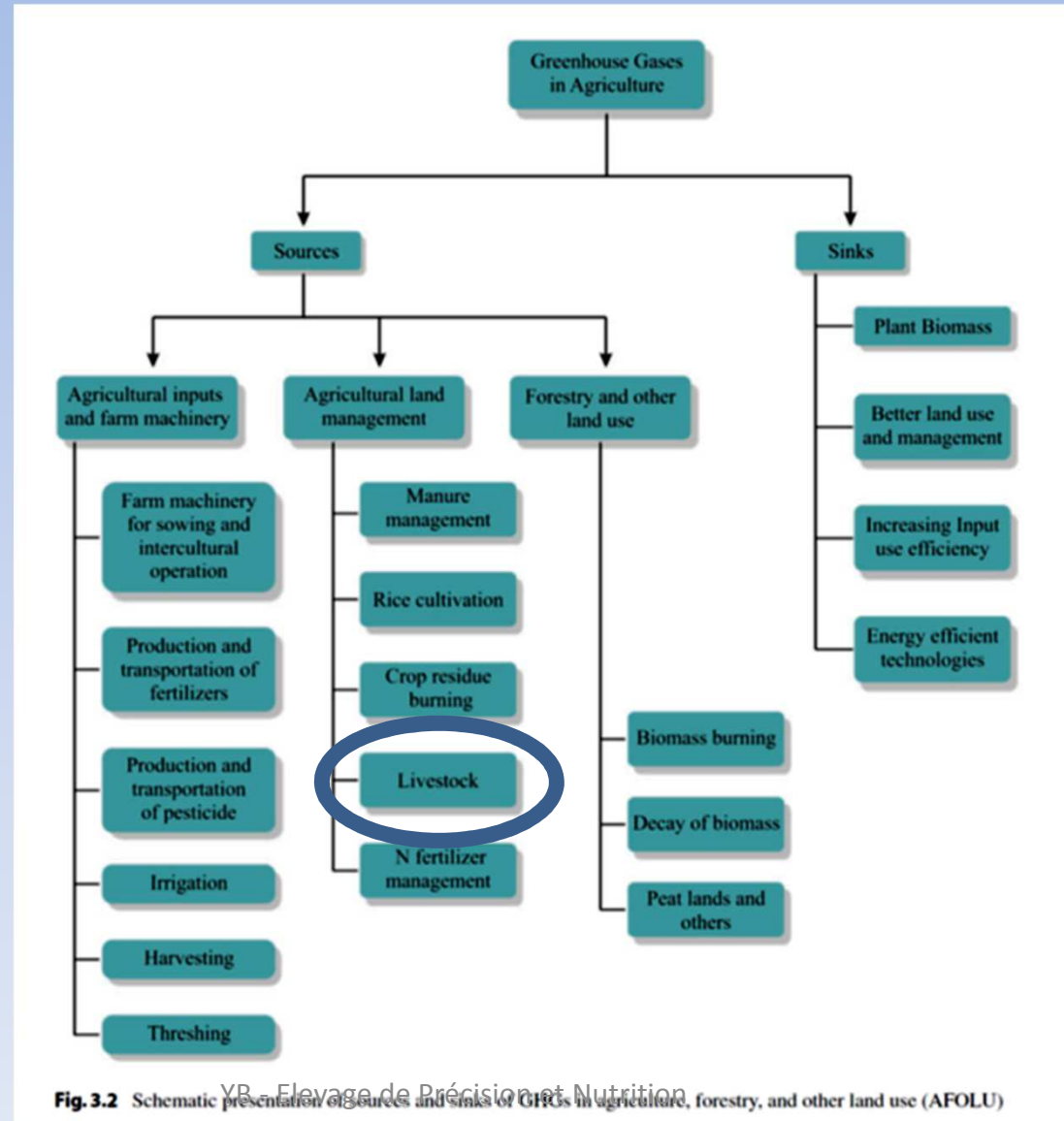
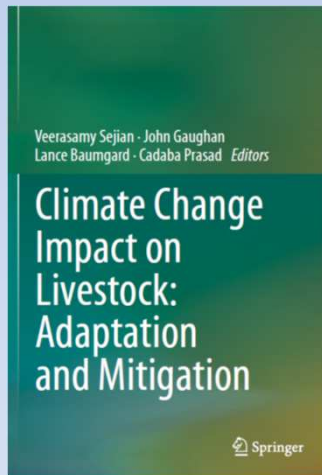


Fig. 3.2 Schematic presentation of sources and sinks of GHGs in agriculture, forestry, and other land use (AFOLU)



Origine du méthane entérique

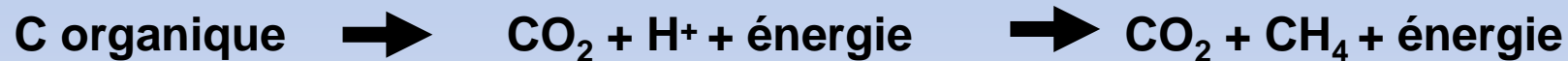
16 à 26 g de méthane par kg de MS
de ration dus aux fermentations dans
le tube digestif

Origine du méthane

- **Écosystème anaérobie**

- sédiments aquatiques
- digesteurs

Séjour prolongé



- **Écosystème anaérobie du tube digestif**

- rumen
- gros intestin

Séjour court

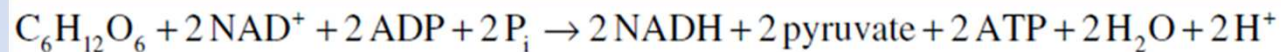
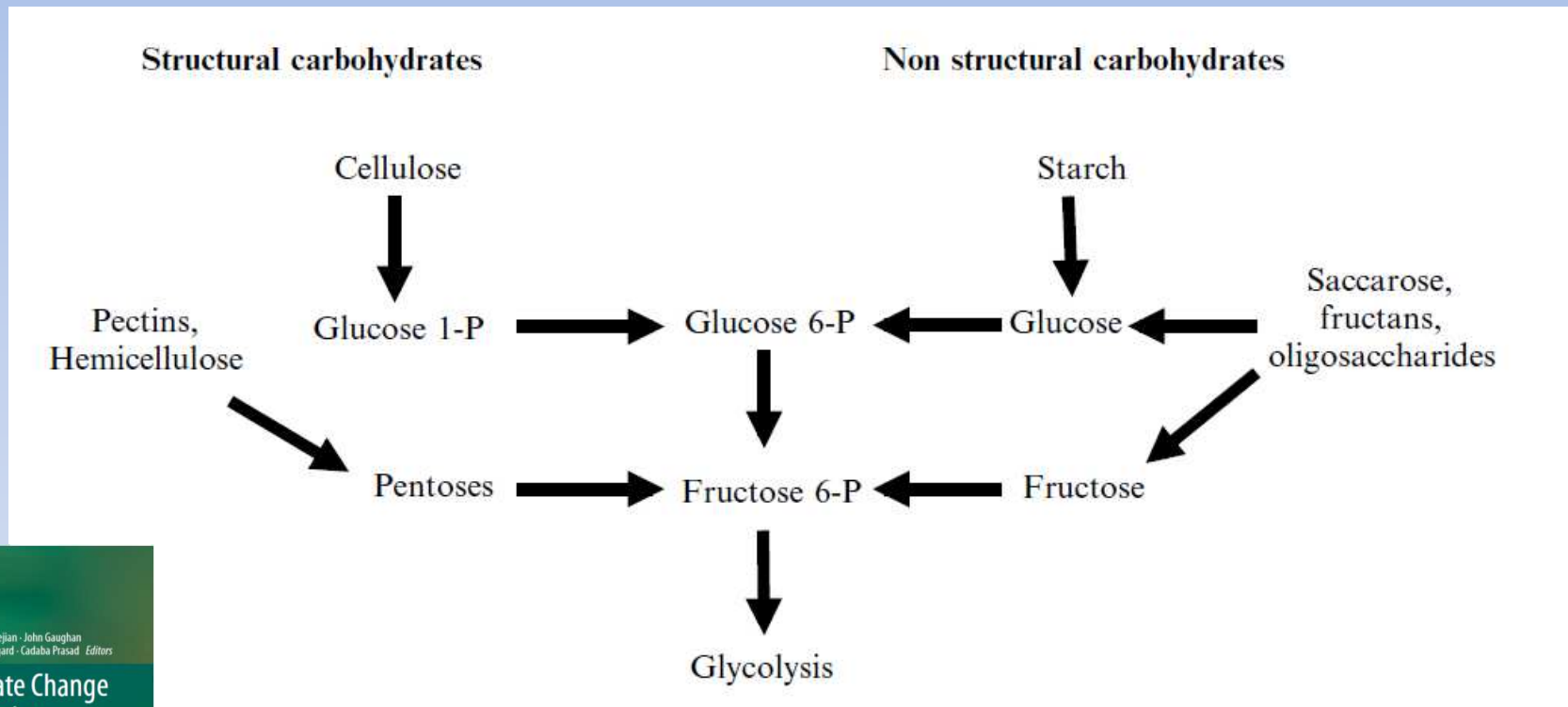


Énergie pour l'animal ←

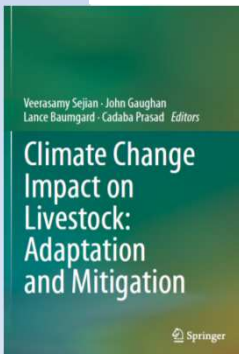
Origine du H₂ dans le rumen

- Les réactions fermentaires en anaérobiose utilise le coenzyme NAD⁺ pour oxyder les hydrates de carbone alimentaires et du NADH/H⁺ est formé
- Le NAD⁺ est ensuite régénéré en produisant du H₂ qui est éliminé par les microorganismes et le H₂ se concentre dans le rumen
- Si le H₂ s'accumule dans le rumen, l'oxydation du NADH/H⁺ en NAD⁺ n'est plus possible et la fermentation s'arrête
 - L'accumulation de H₂ inhibe les fermentations
- Des microorganismes sont capables d'utiliser le H₂ (143 MJ/kg) pour oxyder le CO₂ en CH₄ (55 MJ/kg) et obtenir de l'énergie (*Methanobrevibacter sp.*)

Origine du H₂ dans le rumen



Chaleur + ATP + AGV + X

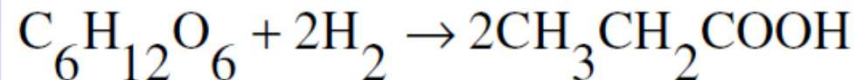


Origine du H₂ dans le rumen

- La production des acides gras volatils (AGV)
 - Avec production de H₂ : acétate et butyrate



- Avec consommation de H₂ : propionate



Origine du méthane

- Les fermentations ruminales

Tableau 1. Principales équations stœchiométriques simplifiées de la fermentation du glucose dans le rumen.

Glucose → 2 pyruvate + 2 H ₂ + 2 ATP + 2 H ₂ O

Glucose → 2 acétate + 4 H ₂ + 2 CO ₂ - 2 H ₂ O + 4 ATP

Glucose → 2 propionate - 2 H ₂ + 2 H ₂ O + 4 ATP

Glucose → butyrate + 2 H ₂ + 2 CO ₂ + 3 ATP

Glucose → AGVmin - H ₂ + 1 CO ₂ + 1 ATP

Sauvant et al., 2011. Productions Animales

- La méthanogenèse ruminale

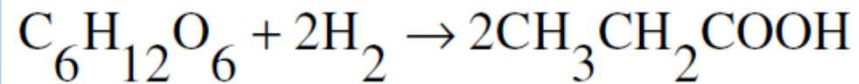




La production de méthane est-elle obligatoire dans le rumen pour éliminer le H₂?

- Obligation de maintenir une concentration faible en H₂ dissous dans le rumen : 0,1 à 50 μM
 - Moins de 3,1 μM avec une ration riche en fourrage
- Autres voies possibles grâce aux microorganismes présents dans le rumen
 - Augmenter la propionogenèse
 - Favoriser l'acétogenèse réductrice
 - Stimuler la réduction des sulfates et/ou des nitrates

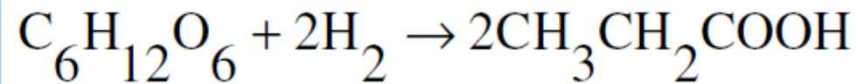
1. Augmenter la proponiogenèse



- Choix du substrat
 - Amidon, pectines vs cellulose, hémicellulose
 - Gros changements requis : à partir de 50 % de concentré !
 - Favoriser la digestibilité
 - Fourrages jeunes avec des hydrates de carbone solubles
 - 10 à 15 % de réduction de la production de méthane
 - Favoriser le niveau d'ingestion
- Eliminer les protozoaires
 - Traitements chimiques
 - Induire des pH plus acides
 - Augmenter le taux de passage des particules dans le rumen

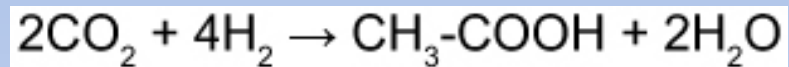


1. Augmenter la proponiogenèse



- Complémentation en acides organiques
 - Fumarate et malate principalement
 - Mobilise du H_2 pour produire du propionate
 - Efficace mais coûteux !
 - Essai long terme ?

2. Favoriser l'acétogenèse réductrice



- Présente dans le rumen à la naissance puis disparaît ...
- Non favorisée dans le rumen
 - Thermodynamique et affinité pour H₂
- Favorisée dans d'autres systèmes digestifs
 - Ex. Kangourou, Wallaby, termite, homme, porcs



3. Favoriser la réduction des sulfates

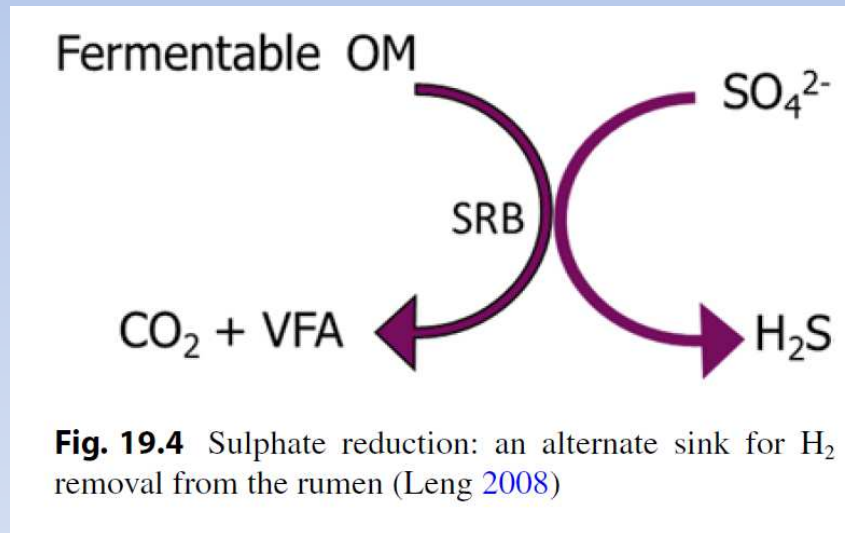
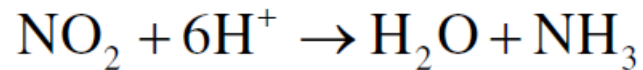
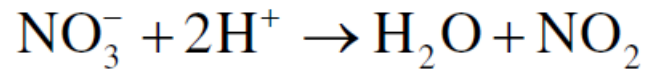


Fig. 19.4 Sulphate reduction: an alternate sink for H₂ removal from the rumen (Leng 2008)

- SRB = sulphate reducing bacteria
ex. *Desulfovibrio* spp.
- Réaction favorisée du point de vue thermodynamique
- Réaction peu présente faute de substrat
 - Acides aminés soufrés
 - Sulfate et sulfite
- Ajout de 2,6 % de sulfates réduit la production de méthane de 16 % (Van Zijderveld *et al.*, 2010)
- H₂S dans le sang peut causer la polyencéphalomalacie ! (Carence en vit. B1)
- H₂S toxique pour les autres microorganismes

3. Favoriser la réduction des nitrates



A review of feeding supplementary nitrate to ruminant animals: nitrate toxicity, methane emissions, and production performance

Chanhee Lee and Karen A. Beauchemin¹

Can. J. Anim. Sci., 2014, 94, 557



Nitrate and Inhibition of Ruminal Methanogenesis: Microbial Ecology, Obstacles, and Opportunities for Lowering Methane Emissions from Ruminant Livestock

Chengjian Yang¹, John A. Rooke², Irene Cabeza² and Robert J. Wallace^{3*}

- NRB = nitrate reducing bacteria
- Les protozoaires seraient aussi actifs
- Réaction favorisée du point de vue thermodynamique
- Plus grande affinité pour le H₂ que le CO₂
- Excès de nitrate peut conduire à l'intoxication par les nitrites et provoquer la méthémoglobinurie
- Bactéries cellulolytiques sensibles aux nitrites
- Adaptation des microorganismes et des animaux à la distribution de quantité massive de nitrate et sulfate
 - Assurer la réduction des nitrites en ammoniac !
- En théorie, 80 à 100 g de nitrates par kg de MS pour une vache laitière pour ne plus produire de méthane!
 - Impossible en pratique !
- Association avec les sulfate peut réduire jusqu'à 40 % la production de méthane

Réduction des nitrates

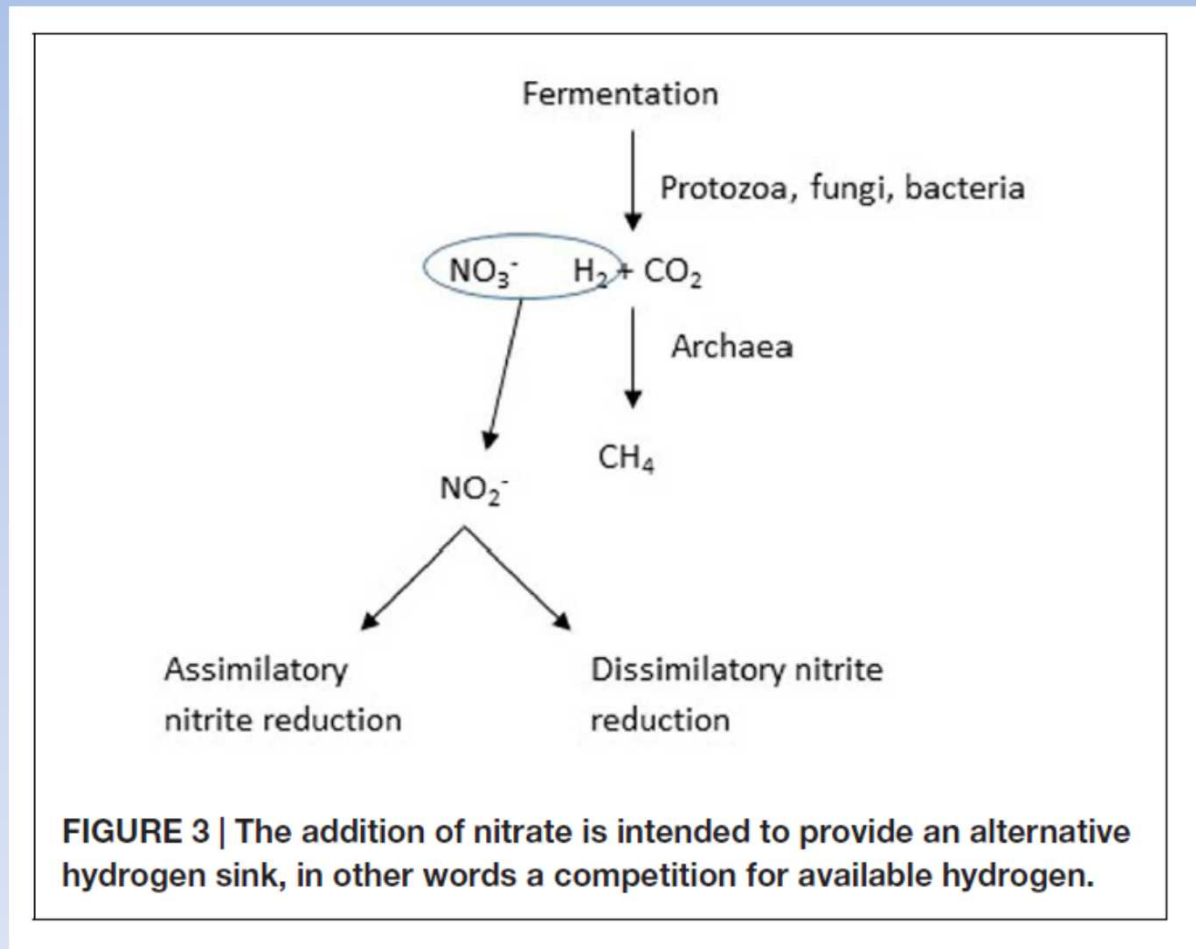
Table 19.2 Effect of nitrate addition on *in vivo* methane emission

Animal species	Nitrate source and level	Methane reduction (%)	Reference
Cattle	5 % potassium nitrate	43	Sophal et al. (2013)
Cattle	22 g nitrate kg ⁻¹ DM	32	Hulshof et al. (2012)
Cattle	6 % KNO ₃	27	Inthapanya et al. (2012)
Cattle	6 % KNO ₃	30	Phuong et al. (2011)
Cattle	21 g nitrate kg ⁻¹ DM	16	van Zijderveld et al. (2011)
Cattle	2.38 % calcium ammonium nitrate	~41	Ascensao (2010)
Sheep	25–30 g NaNO ₃		Takahashi and Young (1991)
Sheep	2.6 % nitrate	32	van Zijderveld et al. (2010)
Sheep	4 % KNO ₃	23	Nolan et al. (2010)
Goat	5 % CaNO ₃	–	

Malik et al., 2015

1 mole de nitrate (62 g) ajoutée signifie 1 mole de méthane (16 g) en moins

Réduction des nitrates



Yang et al., 2016. *Frontiers in Microbiology*, 7:132

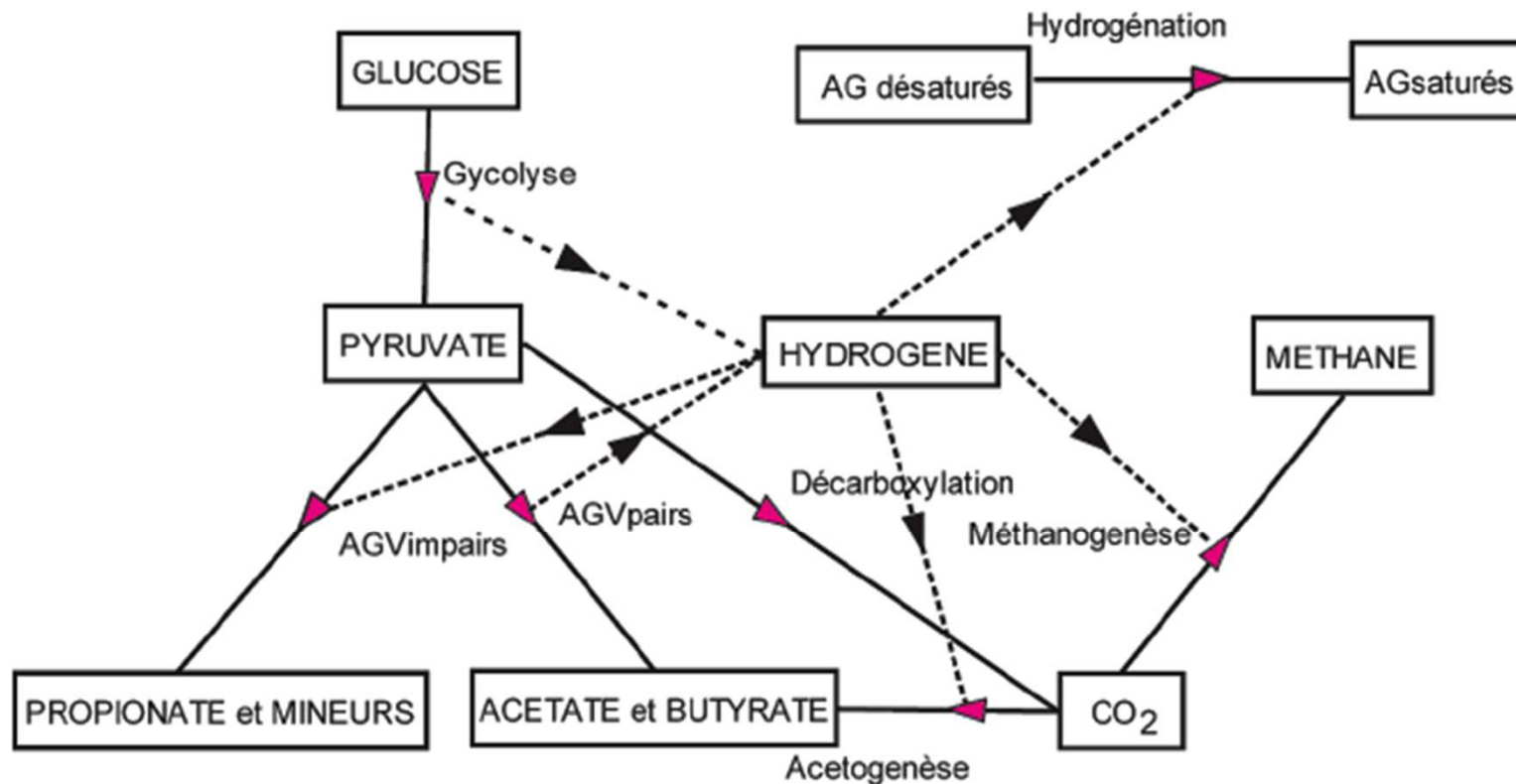


4. Supplémentation en matières grasses

- 2 à 4 % de réduction de méthane par % de lipides ajoutés (Malik *et al.*, 2015)
 - Biohydrogénation des acides gras en présence de H₂
 - Acides gras polyinsaturés (+)
 - Toxicité des acides gras pour les microorganismes
 - Acides gras à chaînes moyennes (++)
- Inhibition des bactéries productrices de H₂
- Effet négatif sur l'ingestion et la digestion au-delà de 6 à 7 % de la MS

Voies d'utilisation de l'hydrogène métabolique au sein du rumen

Figure 4. Les principales voies métaboliques de production et d'utilisation de l'hydrogène dans le rumen.



Voies d'utilisation du H₂

Table 3. Thermodynamic ranking of some H₂ utilising reactions that occur in the rumen; from least to most favourable

Source: adapted from Ungerfeld and Kohn (2006)

Reduction reaction	Electron acceptor concentration (mmol/L)	ΔG^A (kJ)
Pyruvate + H ₂ → lactate	10 ⁻⁶	-5
2CO ₂ + 4H → acetate + H ⁺ + 2H ₂ O	0.016	-9
CO ₂ + 4H ₂ → CH ₄ + 2H ₂ O	0.016	-67
NO ₃ ⁻ + H ₂ → NO ₂ ⁻ + H ₂ O	15	-130
NO ₂ ⁻ + 3 H ₂ + 2H ⁺ → NH ₄ ⁺ + 2H ₂ O	8	-371

^A ΔG is the change in free energy of the reactions.



Leviers d'action pour réduire la production de GES

Du système de production au
microbiome ruminal



Réduire la production de GES

Systèmes productifs

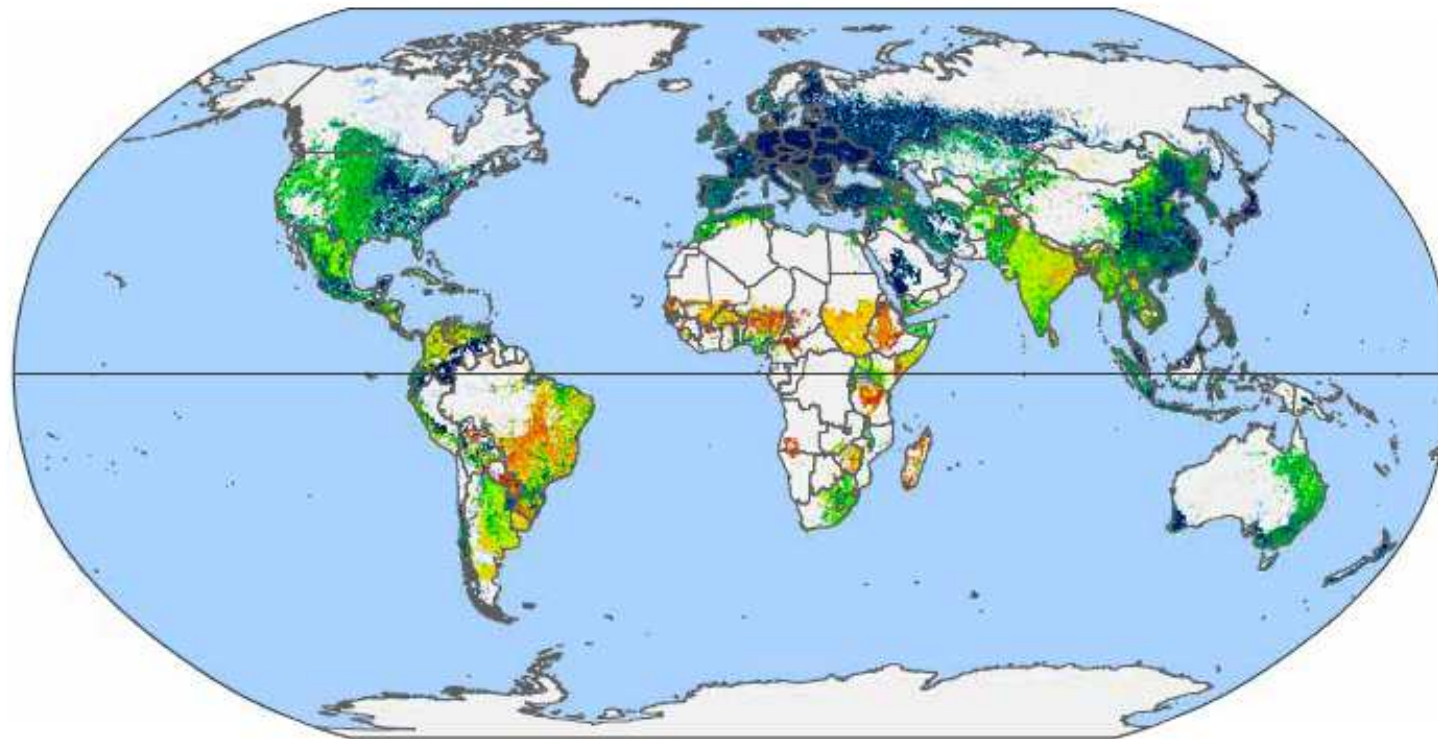
Animaux productifs

Autres utilisation du H₂ dans le rumen

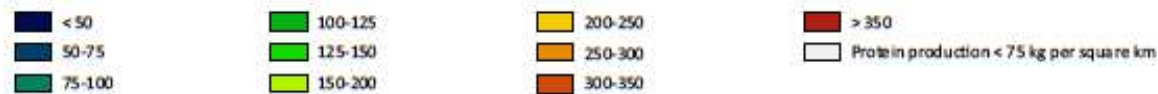
Inhibition des microorganismes produisant du H₂

Efficacité des productions animales

FIGURE 27A. Emission intensity per unit of edible protein



Kg of CO₂ equivalent per kg of edible protein



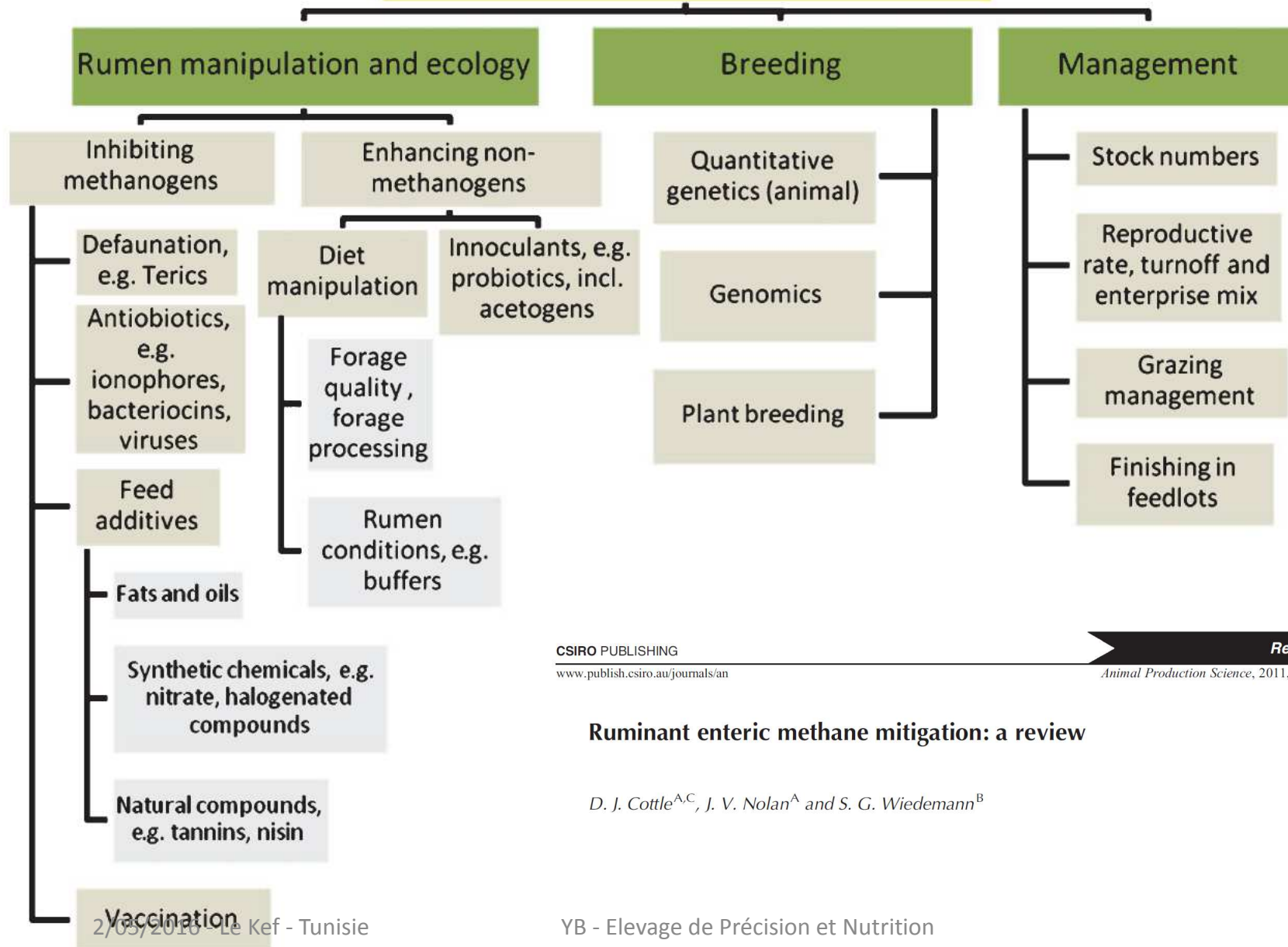
Source: GLEAM.



Leviers d'action

Choix et modalités du système de production pour minimiser les eq. CO₂ par unité de surface et/ou par kg de produit animaux

Enteric Methane Mitigation Options



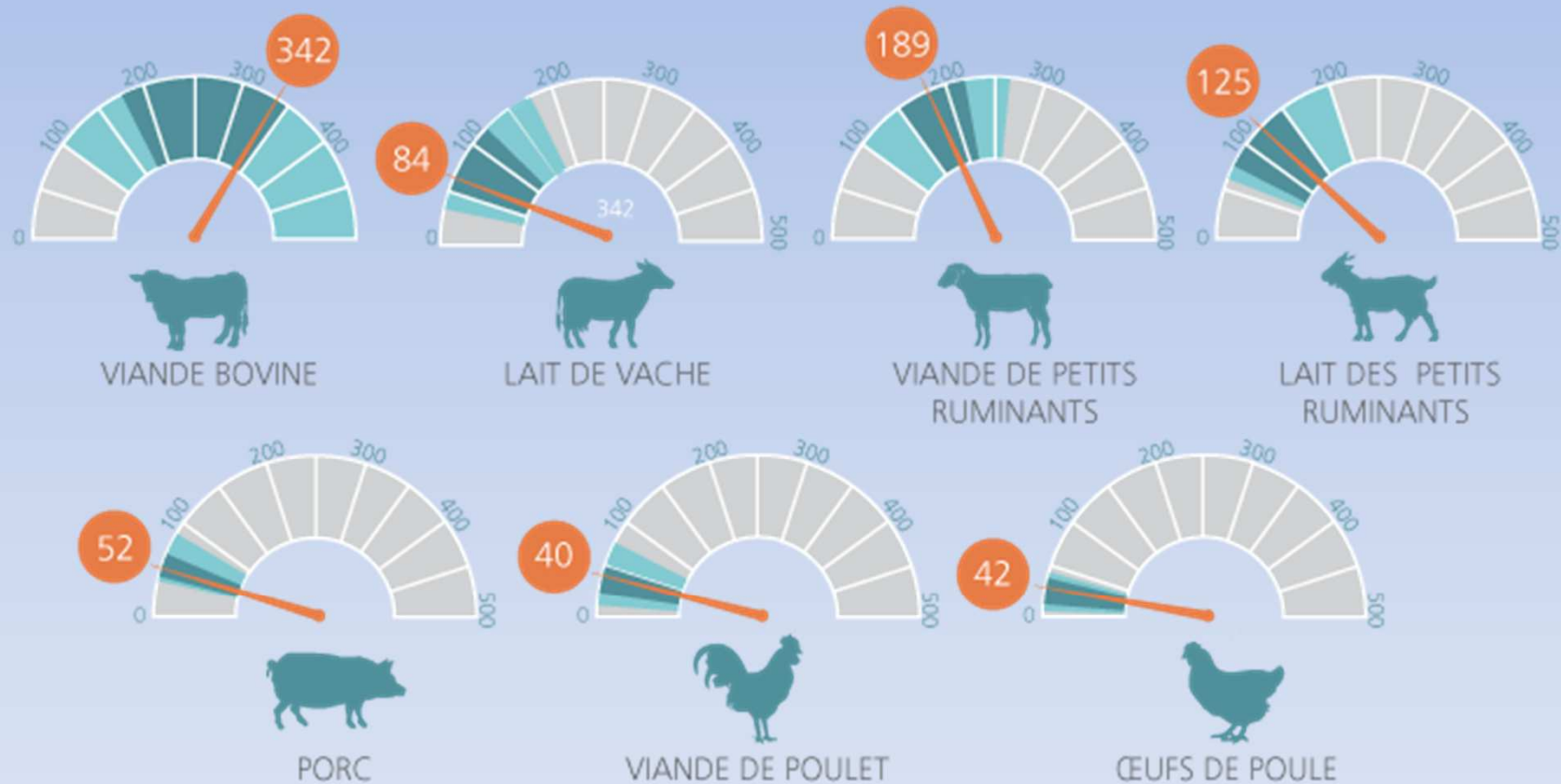
CSIRO PUBLISHING
www.publish.csiro.au/journals/an

Review
Animal Production Science, 2011, 51, 491–514

Ruminant enteric methane mitigation: a review

D. J. Cottle^{A,C}, J. V. Nolan^A and S. G. Wiedemann^B

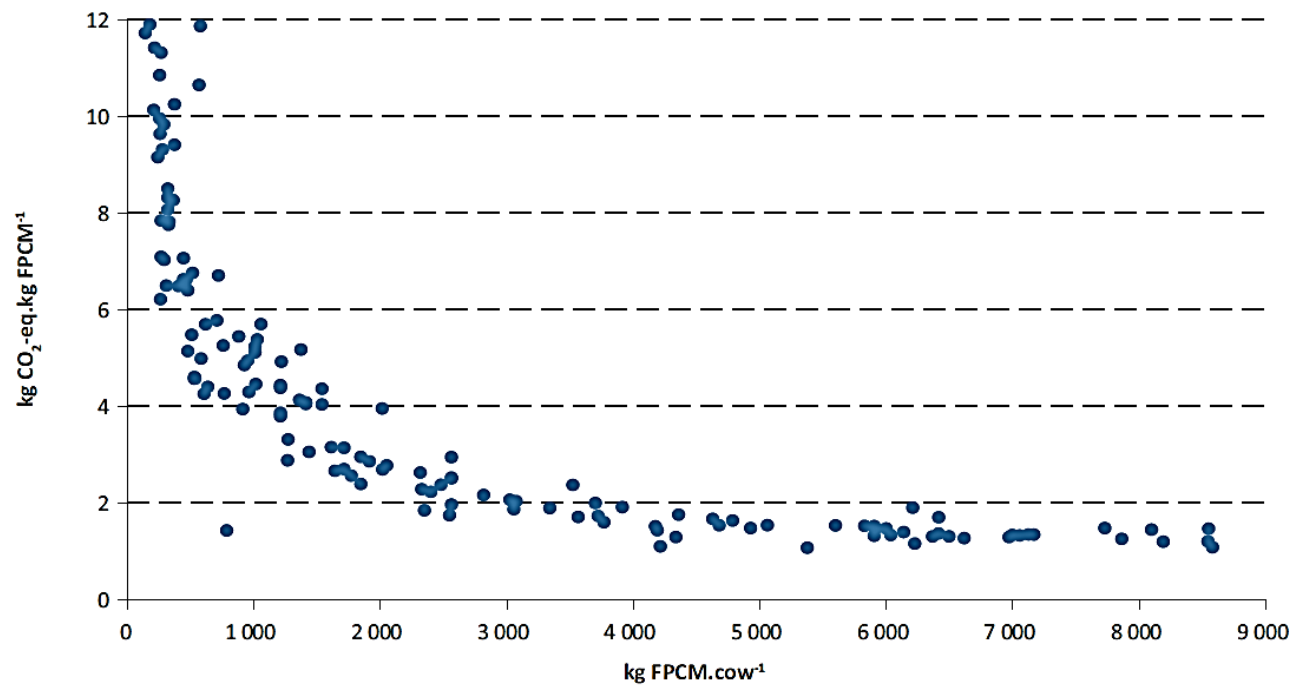
Emissions de GES par kg de protéines



KG ÉQUIVALENT CO₂ PAR KG DE PROTÉINES 90% DE LA PRODUCTION 50% DE LA PRODUCTION MOYENNE

Intensification de la production

FIGURE 23. Relationship between productivity and emission intensity of milk (country averages)



Source: Gerber et al., 2011.



Leviers d'action

Choix des animaux : CH₄ du rumen

Sélection animale



J. Dairy Sci. 99:1959–1967
<http://dx.doi.org/10.3168/jds.2015-10012>
 © 2016, THE AUTHORS. Published by FASS and Elsevier Inc. on behalf of the American Dairy Science Association®. This is an open access article under the CC BY-NC-ND license (<http://creativecommons.org/licenses/by-nc-nd/3.0/>).

Heritability estimates for enteric methane emissions from Holstein cattle measured using noninvasive methods

Jan Lassen¹ and Peter Løvendahl
 Centre for Quantitative Genetic and Genomics, Department of Molecular Biology and Genetics, Faculty of Science and Technology, Aarhus University, PO Box 50, DK-8830 Tjele, Denmark

Table 1. Descriptive statistics such as units, number of cows, mean, standard deviation (SD), and minimum and maximum values for ratio between CH₄ and CO₂ (CH4_RATIO), daily CH₄ production (CH4_GRAMSw), fat- and protein-corrected milk (FPCM), and live weight¹

Trait	Unit	No. of cows	Mean	SD	Minimum	Maximum
CH4_RATIO		3,121	0.087	0.012	0.043	0.109
CH4_GRAMSw	g/d	1,745	315	36.2	243	518
CH4_MILK	g/L	1,745	8.61	1.15	7.23	12.1
FPCM	L/d	3,121	36.6	7.9	19.2	62.7
Live weight	kg	1,745	647	68.4	467	890

¹CH4_GRAMSw, CH4_MILK (CH4_GRAMSw/FPCM), FPCM, and live weight were based on weekly averages.

Emission de méthane

- Héritabilité : CH4_GRAMSw et CH4_Milk = 0,21



Utiliser le H₂ dans d'autres voies métaboliques dans le rumen

Cf. infra

*Effet sur le méthane produit par le
rumen*



Leviers d'action

Modifier l'écologie du rumen : CH₄ du rumen

Métabolites secondaires des plantes

- Ex. Huiles essentielles : composés aromatiques volatils
- Objectif : moduler la flore ruminale
- Potentialité réelle mais ... preuve *in vivo* sur le long terme
- Grand nombre de molécules
 - Effets plantes, stade, culture, extraction, ...
- Mécanismes non compris dans le détail
 - Adaptation du microbiome ruminal
 - Dégâts collatéraux (manque de spécificité)
 - Méthodes *in vivo*, essais en exploitation
- Coût économique ?





Autres antimicrobiens

- Tanins : effet antibactériens sur les méthanogènes mais effets secondaires ou effets contradictoires (nature du tanin)
 - Réduction jusqu'à 20 % de la production de méthane
 - Réduction de la digestion des protéines
- Acide mérystique (C14:0) : effet positif
- Agents défaunants : 10 % de réduction de la production de méthane
- Antiméthanogène
 - Bromoéthanesulfonate (BES)
 - Bromochlorométhane (BCM)
 - Efficace : jusqu'à 50 % de réduction de la production de méthane
 - Mais toxicité et adaptation ?

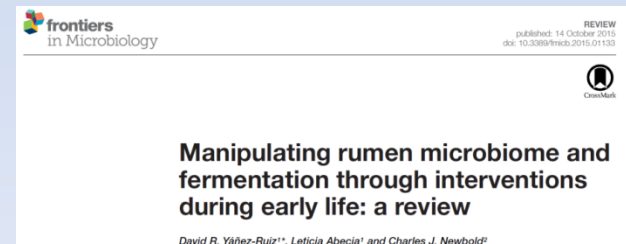
Autres antimicrobiens

- Saponines
 - Détergent avec des propriétés membranolytiques (stérois des eucaryotes)
 - Agit principalement sur les protozoaires
 - 6 à 25 % de réduction de la production de méthane
 - Effet transitoire : adaptation du rumen
- 3-nitroxypropanol : réduction de 30 % du méthane produit sans effets collatéraux et adaptation

Hristov, A.N., Oh, J., Giallongo, F., Frederick, T.W., Harper, M.T., Weeks, H.L., et al. (2015). An inhibitor persistently decreased enteric methane emission from dairy cows with no negative effect on milk production. *Proc. Natl Acad. Sci. U.S.A.* 112, 10663–10668. doi:10.1073/pnas.1504124112

Programmation précoce des microorganismes du rumen

- « Early life nutritional management »
- Les microorganismes dominant dans un rumen mature s'installent dans les 2 à 3 premiers jours après la naissance
- Plusieurs facteurs affectent l'importance et la nature de la colonisation microbienne du rumen
 - Aliments solides, nature et précocité
 - Ensemencement naturel vs artificiel
 - Additifs favorisant ou inhibant des types de microorganismes
 - Le système immunitaire
- Fenêtre d'intervention entre la naissance et 2 à 3 semaines pour installer une microbiome efficace et non émetteur de CH₄





Conclusions



Leviers d'action actuels

- Nombreux et se différenciant en fonction de leur efficacité et de leur rapidité
 - Le plus lent : sélection animale
 - Le plus rapide : composés chimiques contrôlant les microorganismes du rumen et récepteurs d'électrons
- Applicabilité sur le terrain à démontrer

Table 1. Feed additives and feeding strategies targeting enteric methane (CH₄) emission mitigation

Category ¹	Potential CH ₄ mitigating effect ²	Long-term effect established	Effective ³	Environmentally safe or safe to the animal ⁴	Recommended ⁵
Inhibitors					
BCM and BES ⁶	High	? ⁷	Yes	No ⁸	No
Chloroform	High	No?	Yes	No	No
Cyclodextrin	Low	No	Yes	No	No
3-nitrooxypropanol	Medium	?	Yes	?	?
Electron receptors					
FMA ⁹	No effect to High	?	?	Yes	No?
Nitroethane	Low	No	Yes?	No	No
Nitrate	High	No?	Yes	?	Yes? ¹⁰
Ionophores ¹¹	Low ¹²	No?	Yes? ¹²	Yes?	Yes?
Plant bioactive compounds¹³					
Tannins ¹⁴ (condensed)	Low	No?	Yes	Yes	Yes?
Saponins	Low?	No	?	Yes	No?
Essential oils	Low?	No	?	Yes	No
Exogenous enzymes	No effect to Low	No	No?	Yes?	No?
Defaunation	Low	No	?	Yes	No
Manipulation of rumen archaea and bacteria	Low?	No	?	Yes?	Yes? ¹⁵
Dietary lipids	Medium	No?	Yes	Yes	Yes? ¹⁶
Inclusion of concentrate ¹⁷	Low to Medium	Yes	Yes	Yes	Yes? ¹⁸
Improving forage quality	Low to Medium	Yes	Yes	Yes	Yes
Grazing management	Low	Yes	Yes?	Yes	Yes? ¹⁹
Feed processing	Low	Yes	Yes ²⁰	Yes ²⁰	Yes ²⁰
Mixed rations and feeding frequency ²¹	?	?	?	Yes	?
Precision (balanced) feeding and feed analysis	Low to Medium	Yes	Yes?	Yes	Yes ²²

Hristov et al., 2013. J. Anim. Sci. 91:5145

Les leviers d'action futurs

- Ils se baseront sur une meilleure connaissance des microorganismes du rumen à l'aide des outils biomoléculaires disponibles et à venir
- La programmation précoce et la sélection animale sont à explorer
- Idéalement l'objectif est de rediriger l'énergie perdue actuellement sous la forme de méthane (2 à 12 % de l'énergie ingérée) en énergie utile à l'animal
- Combiner des stratégies au niveau de l'animal
- Le mangement du système de production reste une priorité sur le court et le moyen terme