

Les facteurs de réussite du traitement des pailles à l'urée

Chenost M.

in

Tisserand J.-L. (ed.).

Les pailles dans l'alimentation des ruminants en zone méditerranéenne

Zaragoza : CIHEAM

Options Méditerranéennes : Série B. Etudes et Recherches; n. 6

1994

pages 47-60

Article available on line / Article disponible en ligne à l'adresse :

<http://om.ciheam.org/article.php?IDPDF=95605267>

To cite this article / Pour citer cet article

Chenost M. **Les facteurs de réussite du traitement des pailles à l'urée.** In : Tisserand J.-L. (ed.). *Les pailles dans l'alimentation des ruminants en zone méditerranéenne*. Zaragoza : CIHEAM, 1994. p. 47-60 (Options Méditerranéennes : Série B. Etudes et Recherches; n. 6)



<http://www.ciheam.org/>
<http://om.ciheam.org/>

Les facteurs de réussite du traitement des pailles à l'urée

M. CHENOST
INRA
CLERMONT-FERRAND/THEIX
FRANCE

RESUME - L'utilisation de l'urée pour le traitement des pailles constitue une intéressante alternative à l'emploi de l'ammoniac anhydre - en particulier dans les pays en développement. Son efficacité repose d'une part sur l'intensité de l'uréolyse et d'autre part sur les effets de l'ammoniac produit sur la composition de la paille. L'apport d'énergie sous forme de soja augmente la vitesse de réaction d'uréolyse dans le cas de températures peu élevées et d'humidité faible - les conditions de traitement pour avoir une amélioration maximum de la valorisation de la paille sont surtout quantité d'urée (5 à 8%), température (15 à 25°C), humidité (50 à 60%) ainsi que la répartition homogène de l'uréase et l'humidité du silo.

Mots-clés : Paille, traitement urée, uréolyse

SUMMARY - "Achievement factors in urea treatment of straw". The use of urea instead of anhydrous ammonia for straw treatment can be particularly interesting in developing countries. Its efficacy is based both on ureolysis intensity and on the effects on straw composition induced by the ammonia produced. Energy supplied as soybean, enhance ureolysis reaction speed when low temperature and weak humidity. Most important treatment conditions, in order to achieve a maximum improvement in straw valorization, are urea amount (5-8%), temperature (15-25°C), humidity (50-60%) and also a homogeneous distribution of urease and moisture in storage

Key words: Straw, urea treatment, ureolysis

Introduction

Le traitement des pailles à l'ammoniac s'est beaucoup développé dans la pratique, depuis la mise au point par Sundstøl *et al.*, en 1978, de la technique d'injection d'ammoniac anhydre dans la paille disposée en meule recouverte d'un film de plastique.

Toutefois cet ammoniac n'est pas toujours disponible dans les exploitations, en raison de l'absence soit de réseaux de distribution de l'ammoniac soit, dans certaines régions ou même certains pays, de l'ammoniac lui-même. Une alternative est l'urée qui, incorporée dans la masse de paille en présence d'eau et à des températures favorables, s'hydrolyse en ammoniac.

Le traitement dit "à l'urée", est alors la résultante de deux processus. Le premier est l'uréolyse. Le second est l'action de l'ammoniac généré progressivement au cours de l'uréolyse sur la paille.

Les facteurs de réussite du "traitement à l'urée" à considérer, peuvent ainsi être rangés dans les catégories suivantes : (i) celle regroupant les facteurs qui conditionnent l'uréolyse ; (ii) celle regroupant les facteurs qui conditionnent le traitement à l'ammoniac proprement dit.

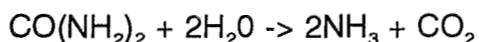
Comme l'uréolyse et la réaction sur la paille de l'ammoniac généré interviennent simultanément, il faudra également considérer les facteurs communs à ces deux catégories pouvant avoir une influence réciproque sur les deux processus. (iii) Enfin, les facteurs d'ordre plus technique et pratique touchant à la réalisation même du chantier.

L'objet de ce texte est de faire un tour d'horizon de ces différents facteurs. Ceux-ci ayant fait l'objet de nombreuses études, on s'efforcera ici de faire ressortir les aspects d'ordre pratique qui n'apparaissent pas toujours de manière explicite dans les publications scientifiques.

Facteurs de réussite de l'uréolyse

Ils ont été présentés par Cordesse (1992, sous presse), nous en rappellerons les grandes lignes et les principales conséquences pratiques.

L'uréolyse est une réaction enzymatique par laquelle l'uréase transforme une molécule de gaz carbonique. La réaction simplifiée est :



elle montre que 60 g d'urée génèrent 34 g d'ammoniac.

Elle implique la présence d'uréase, d'eau et d'une certaine quantité de chaleur. Sa vitesse dépend de la simultanéité de tous ces facteurs. La réaction est optimum à 30°C et sa vitesse est multipliée par le facteur 2 à toute augmentation de la température de 10°C ($Q_{10} = 2$) jusqu'à la température maximum de 95°C au-delà de laquelle, l'activité de l'uréase devient nulle. L'humidité optimum est de l'ordre de 30 à 40%.

Présence d'uréase

L'enzyme provient soit du système enzymatique de la plante, généralement très faible chez les pailles, végétal mort, soit des bactéries uréolytiques présentes dans le milieu (terre, végétaux, fumier, urine, etc.).

Cette uréase d'origine tellurique est finalement suffisante, du moins dans les conditions d'humidité normales (35-40%), pour assurer la bonne évolution de la réaction (Williams *et al.*, 1984a,b ; Hassoun, 1987 ; Cordesse, 1992 sous presse).

Son influence sur l'uréolyse a fait l'objet de nombreux travaux (Williams *et al.*,

1984a ; Jayasuriya *et al.*, 1983, en autres). Elle a fait l'objet d'une étude plus poussée par Sahnoune (1990).

Influence combinée uréase/humidité/durée

C'est précisément à partir des travaux de Sahnoune (1990) et Sahnoune *et al.* (1991), effectués en laboratoire à la température de 30°C, que nous résumerons l'essentiel de l'interaction eau/uréase sur l'évolution de l'uréolyse d'une solution d'urée en présence de paille. L'uréase était apportée non pas sous forme pure (très chère), mais à l'aide de farine de soja cru qui en est riche. Il existe beaucoup d'autres plantes riches en uréase dont le Jackbean (*Canavalia ensiformis*), bien connu sous les tropiques.

La Fig. 1 montre que l'uréolyse décroît lorsque la teneur en matière sèche du milieu augmente (ou que l'humidité diminue) et, cela, essentiellement à partir d'une teneur en MS de 70%, ou d'humidité inférieure à 30%. Plus la dose initiale d'urée est importante, moins l'uréolyse est aisée et il faut même, dans le cas d'une dose de 8%, une humidité d'au moins 35% pour que l'uréolyse soit achevée en 3 semaines (de 30% pour 12 semaines, Fig. 1a₈).

L'apport d'uréase (Fig. 1b₄ et 1b₈) sous forme de soja améliore l'uréolyse, surtout pour les doses initiales d'urée élevées et essentiellement aux teneurs en matière sèche élevées (ou en humidité faibles, inférieures à 25%). L'humidité minimale permettant d'hydrolyser totalement 4% d'urée, est de 25% à 12 semaines (Fig. 1a₄), l'addition de soja permet d'obtenir le même résultat en six semaines (Fig. 1b₄). A une humidité de 25% (teneur de MS de 75%) l'addition de soja permet d'obtenir le même degré d'uréolyse (51%) de 8% d'urée initiale au bout de 3 au lieu de 12 semaines (Fig. 1 a₈ et b₈).

L'apport d'uréase permet donc de faire des économies sur l'eau à ajouter. On peut, en effet, atteindre des degrés d'uréolyse corrects (50-60%) à 20% seulement d'humidité, même avec des doses d'urée initiales élevées (Fig. 1b₈). Il permet aussi, mais à des teneurs en humidité de l'ordre de 25-30%, de réduire les durées de traitement (ou plus exactement d'uréolyse) de l'ordre de la moitié (12 à 6 et 6 à 3 semaines).

C'est dans cet esprit que des travaux ont été engagés par Besle *et al.* (1990), Besle *et al.* (1990) et Chenost et Besle (1992) sur la mécanisation au champ du traitement des pailles à l'urée. Le traitement à l'urée suppose, pour que l'uréolyse soit correcte, des teneurs en humidité d'au moins 30-35% (Fig. 1) donc des quantités d'eau à rajouter élevées. L'uréase permettant de réduire ces quantités d'eau (humidité de 20-25%), il devenait dès lors possible d'envisager l'incorporation directe de l'eau et de l'urée au moment de la fabrication des balles sans avoir à déplacer trop d'eau entre la ferme et le champ. Les quantités d'uréase apportées (Sahnoune, 1990) étaient de l'ordre de 20 g par l d'eau, soit un apport de soja cru de l'ordre de 1/10 à 1/5 du poids de l'urée.

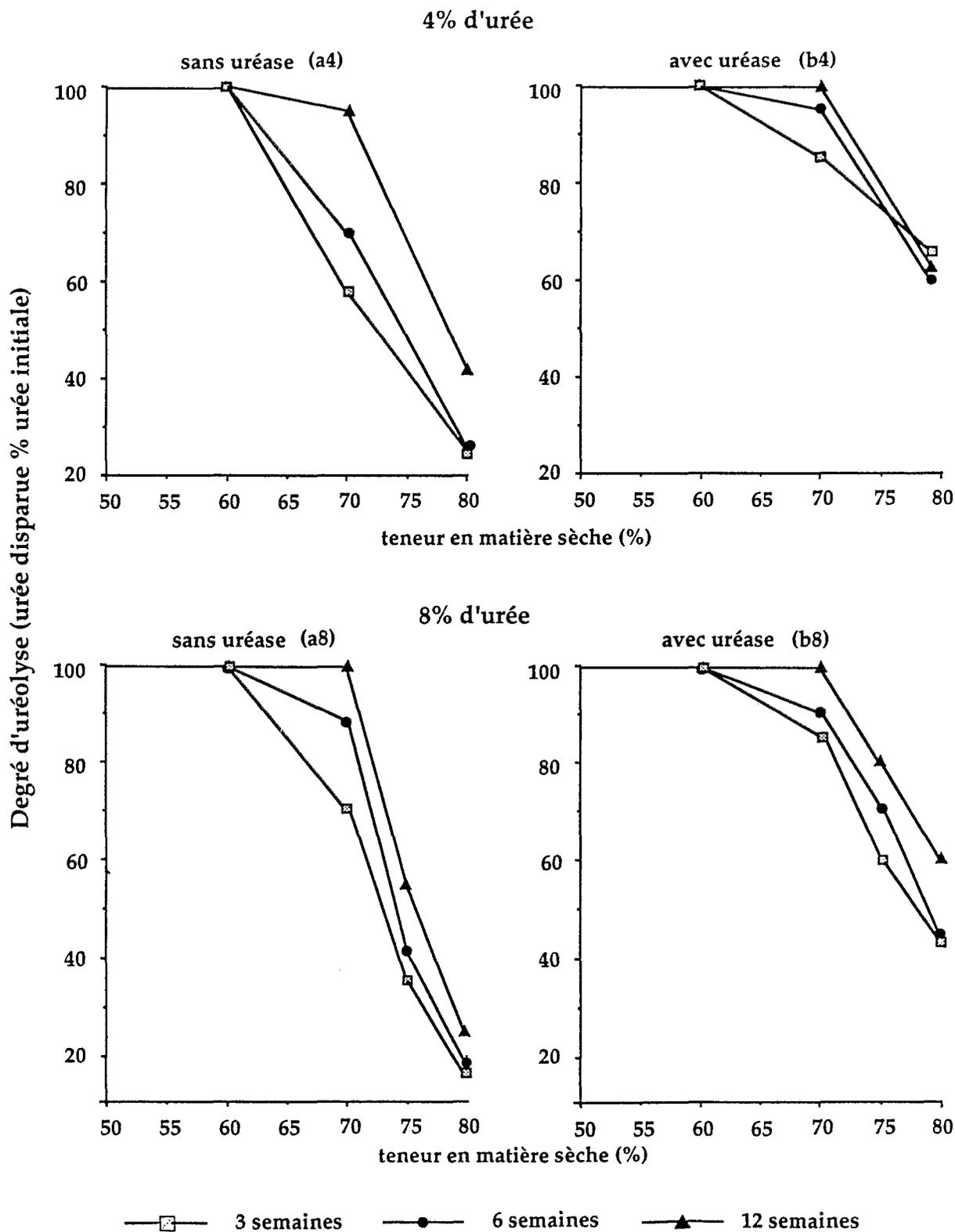


Fig. 1 Influence de la teneur en matière sèche du milieu (paille + solution d'urée), sur le degré d'uréolyse pour des doses initiales d'urée de 4 g (a4, b4), ou de 8 g (a8, b8) d'urée par 100g de paille (à 90% MS) en présence (b) ou non (a) d'uréase. Les mesures sont effectuées au bout de 3, 6 et 12 semaines de traitement. S. Sahnoune, 1990.

Influence combinée uréase/température/durée

L'adjonction d'uréase permet d'augmenter la vitesse de réaction de l'uréolyse (cf. plus haut) donc de pallier une éventuelle diminution de cette réaction, due à une baisse de température. Il convient toutefois de ne pas trop dépasser par défaut les limites inférieures (de l'ordre de 10°C, en deçà desquelles l'uréolyse ne pourra de toutes façons plus être complète) comme le montrent également les résultats de Muñoz *et al.* dans leurs essais CIHEAM/CEE.

Le paramètre température, le plus important avec l'humidité, ne présente pas de contraintes en milieu tropical. Il peut en présenter en milieu tempéré et méditerranéen (et tropical d'altitude). Un traitement effectué à 35-40% d'humidité est achevé en 3 semaines (voire 10 jours pour l'uréolyse proprement dite) en milieu tropical (30°C) alors qu'il faudra compter le double (5 à 6 semaines) en zone tempérée (été, 20°C) où les nuits, qui risquent d'être fraîches, peuvent ralentir l'uréolyse.

Facteurs de réussite du traitement alcalin

Ce sont la quantité d'ammoniac, la température, l'humidité, la durée du traitement et la nature du matériel fourrager à traiter.

Ils ont fait l'objet de nombreuses mises au point parmi lesquelles on pourra se référer à celle de Sundstøl et Coxworth (1984).

La quantité d'ammoniac et, par conséquent, d'urée

D'après les études expérimentales et les résultats de terrain des dix dernières années, on peut dire que les doses d' NH_3 permettant d'obtenir les traitements optimaux, sont comprises entre 3 et 5 kg par 100 kg de matière sèche de paille. Or, en supposant que la réaction d'uréolyse est totale, 1 kg d'urée génère $34/60 = 0,57$ kg d' NH_3 . Il conviendrait donc, théoriquement, d'appliquer une dose d'urée comprise entre respectivement, $3/0,57 = 5,3$ et $5/0,57 = 8,8$ kg d'urée par kg de matière sèche de paille, c'est-à-dire entre $5,3 \times 0,875 = 4,6$ kg et $8,8 \times 0,875 = 7,7$ kg d'urée par kg de paille brute (dont la teneur moyenne en matière sèche est de 87,5%).

Ce sont, en fait, des doses de 5 à 6 kg d'urée par kg de pailles brutes qui sont généralement appliquées dans la pratique, et avec succès, à travers par exemple, les projets TCP¹ du Maroc sur les pailles de blé (5%, par Dias da Silva, communication personnelle), sur les pailles de riz de Madagascar (6%, par Chenost, communication personnelle) et de Chine (5%, par Dolberg, communication personnelle) ou encore sur les pailles de blé, d'orge et d'avoine de Tunisie (5% par Rokbani, communication personnelle). A remarquer les doses plus faibles de l'ordre de 4 à 5%, généralement vulgarisées en Asie du Sud-Est sur les pailles de riz au Sri Lanka et au Bangladesh (Schiere et Ibrahim, 1989). Des doses expérimentales de 8% appliquées sur les tiges

¹TCP : Technical Cooperation Programme de la FAO

de maïs traitées en "vrac" en fosses ou en balles en tas, dans la région Kilimandjaro, n'ont pas entraîné d'amélioration supplémentaire significative de la digestibilité et de la teneur en équivalent azoté, par rapport à la dose de 6% maintenant adoptée (Chenost *et al.*, à paraître).

En fait, la grande variabilité dans les caractéristiques pariétales et la valeur nutritive des pailles due au génotype, au milieu et aux conditions agronomiques de culture du grain correspondant, confère aux pailles une grande variabilité dans leur aptitude, mesurée par l'augmentation de la dms *in sacco*, à répondre au traitement. C'est ainsi que Dias da Silva et Guedes (1990) relie cette aptitude au pouvoir tampon phosphate, à la DO_{280} de l'extrait tampon phosphate et aux liaisons ester saponifiables de cet extrait (24 pailles appartenant à 6 cultivars de blé, de seigle et de triticale, cultivés dans 4 milieux agro-écologiques différents). Colucci *et al.* (1992) observent que cette aptitude, d'autant plus importante que la digestibilité initiale est faible, est plus élevée pour les pailles d'avoine que pour les pailles d'orge (14 pailles d'orge et 9 pailles d'avoine).

Ces constatations, à étayer par des travaux complémentaires, semblent donc montrer qu'il n'existerait pas une mais plusieurs doses optimums de traitement différentes et propres à chaque paille selon ses caractéristiques. Malheureusement les moyens de prédiction de ces caractéristiques sont encore limités. C'est, toutefois, les techniques de l'absorbance (DO_{280}) des composés phénoliques et de l'indice de saponification, proposées par Lan et Van Soest (1981), qui sont actuellement les plus prometteuses.

La température

Les températures requises pour la réaction d'uréolyse, seront de toutes façons suffisantes et non limitantes de l'action alcaline de l'ammoniac, qui est d'autant plus rapide que la température est élevée, comme l'ont bien indiqué entre autres, Sundstøl *et al.* (1978) et Alibès *et al.* (1983). L'augmentation potentielle de digestibilité due à l'ammoniac, est atteinte en 4 semaines à des températures comprises entre 15 et 25°C, alors qu'elle n'est pas tout à fait atteinte au bout de 8 semaines à des températures voisines de 5°C (Fig. 2, Sundstøl *et al.* (1978)). A ces faibles températures il est de toutes façons évident que l'uréolyse serait mise en danger.

L'humidité

Les niveaux d'humidité nécessaires pour l'uréolyse, restent parfaitement compatibles avec ceux requis pour le traitement alcalin. Il est évident que des teneurs en matière sèche trop élevées, ne sont plus à craindre comme pour le traitement à l'ammoniac anhydre, où les pailles risquent souvent d'être trop sèches. En revanche, des niveaux d'humidité trop élevés, pouvant survenir par exemple dans le cas de traitement de résidus humides au départ, comme des feuilles de canne à sucre, des tiges de maïs de région tempérée ou des pailles de riz de première récolte ou mal séchées, peuvent être indésirables et nuire à la bonne diffusion de l'ammoniac qui, étant hydrophile, peut être piégé par les parties végétales les plus humides.

Le résultat est ni un ensilage (pH trop élevé conduisant à de mauvaises fermentations) ni un traitement alcalin, mais une masse végétale déliquescence généralement mal acceptée par les animaux, et toxique. Sans aller jusqu'à cet extrême, un traitement humide et un peu sous dosé, risque de ne pas créer une atmosphère suffisamment ammoniacale et de favoriser ainsi le développement de moisissures.

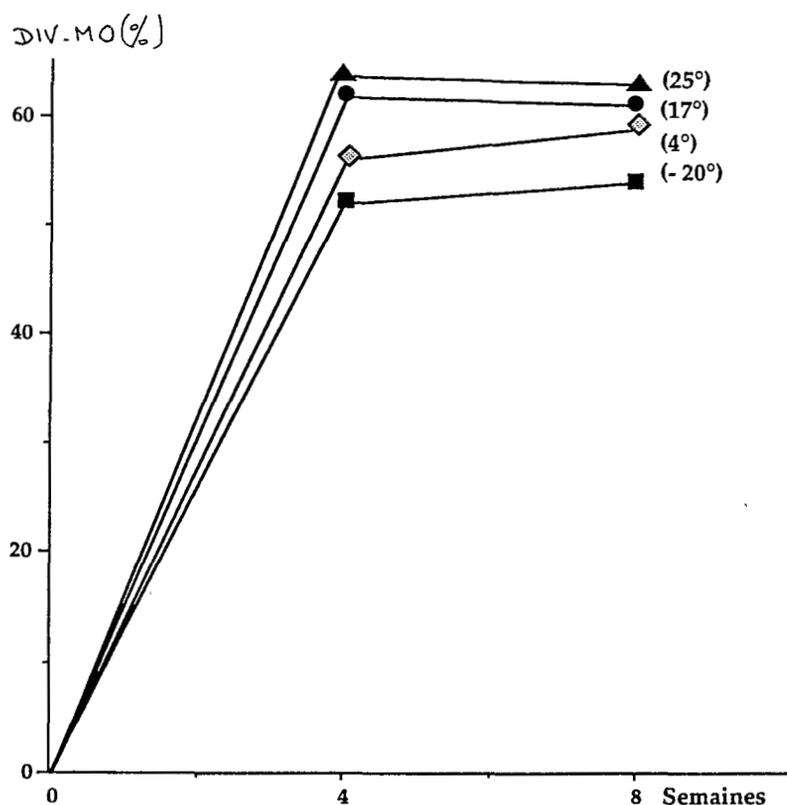


Fig. 2 Influence de la température et de la durée du traitement sur l'évolution de la digestibilité de la matière organique d'une paille d'avoine (de 25% MS) traitée à raison de 3,4 g d' NH_3 par 100 g de MS de paille. Sundstøl *et al.*, 1978.

La durée du traitement

Celle requise pour l'uréolyse est en général suffisante. Toutefois comme le dégagement d'ammoniac, d'une part est plus lent que celui, brutal, du traitement par injection d'ammoniac anhydre, et d'autre part s'effectue en phase plus humide et en présence de composés intermédiaires de la réaction d'uréolyse, certains phénomènes sur les cinétiques de la fixation de l'azote et de la dégradation alcaline des parois végétales doivent être précisés. Ils ont fait l'objet d'études plus détaillées par Sahnoune (1990), essentiellement dans le cas de traitements effectués à des températures modérées nécessitant des durées plus longues. On peut,

schématiquement, résumer ces phénomènes en disant que la fixation de l'azote sur les parois sous forme soluble (sels d'acides pariétaux, carbonates, bicarbonates et carbamates) et sous forme insoluble (amides et autres formes non connues) est plus rapide que l'hydrolyse alcaline de la paroi et, par là, que l'amélioration de la digestibilité. L'humidité influe plus sur l'évolution de la digestibilité que sur la fixation de l'azote. Cette évolution est moins rapide et moins élevée que dans le cas du traitement à l'ammoniac anhydre, en raison de la formation de carbamates et de bicarbonates d'ammonium, qui "piègent" une partie de l'ammoniac et le rendent moins réactif sur la paroi. C'est ce que semblent également montrer les résultats de Muñoz *et al.* dans les essais CIHEAM/CEE.

Cette évolution va, dans l'ordre décroissant de rapidité, respectivement des traitements à l'ammoniac, à l'ammoniac, à l'urée "indirecte" (non en contact avec la paille) puis à l'urée + soja en mélange et, enfin, à l'urée seule en mélange avec la paille (méthode classique). Ces écarts diminuent avec la durée du traitement.

Influence de l'uréase sur la qualité du traitement

L'adjonction d'une source d'uréase permet, on l'a vu, de parfaire l'uréolyse particulièrement aux teneurs en humidité réduites (recherchées pour des économies d'eau) et aux températures inférieures à l'optimum.

Elle permet, en même temps, de faciliter la fixation de l'azote et la dégradation alcaline de la paroi (Sahnoune, 1990). La fixation d'azote est améliorée essentiellement pendant les 3 premières semaines, les différences avec un milieu comparable mais sans uréase s'atténuant par la suite (cf. Muñoz *et al.*, également).

Il en est de même de la digestibilité (estimée par la densité optique à 280 nm, Besle *et al.*, 1989), qui augment d'autant plus que le milieu est moins humide et à forte concentration en urée (Sahnoune, 1990 confirmant les observations de Jayasuriya et Perera, 1982 et de Kiangi *et al.*, 1981). Cette influence bénéfique de l'uréase sur l'amélioration de la digestibilité apparaît également dans les résultats de l'essai CIHEAM/CEE entrepris par Chenost, Besle et Dulphy (Fig. 3).

Aspects pratiques de la réussite du traitement

Les paramètres biologiques de l'uréolyse et de la dégradation alcaline des parois végétales étant fixés, encore convient-il d'assurer que les conditions pratiques du traitement (uréolyse + action alcaline), vont permettre leur maintien effectif depuis la fermeture jusqu'à l'ouverture de l'enceinte de traitement, notamment dans le cas de volumes traités importants. Traiter plusieurs tonnes de paille à l'urée est en effet une autre opération que de traiter quelques centaines de g en bocaux ou en sacs plastique.

Les éléments déterminant la réussite des traitements à grande échelle vont être d'abord, l'homogénéité de l'incorporation de l'urée soit en solution sur substrats secs

comme la paille, soit en granulés sur substrats humides comme les tiges de maïs tempérées. Ce sont ensuite, la bonne diffusion de l'ammoniac généré au sein de la masse végétale.

Un autre aspect important sera l'herméticité de traitement, tant au point de vue de pertes de la solution d'urée introduite ou de l' NH_3 généré, que du point de vue anaérobie garantissant contre l'implantation de moisissure puisque le milieu traité est humide.

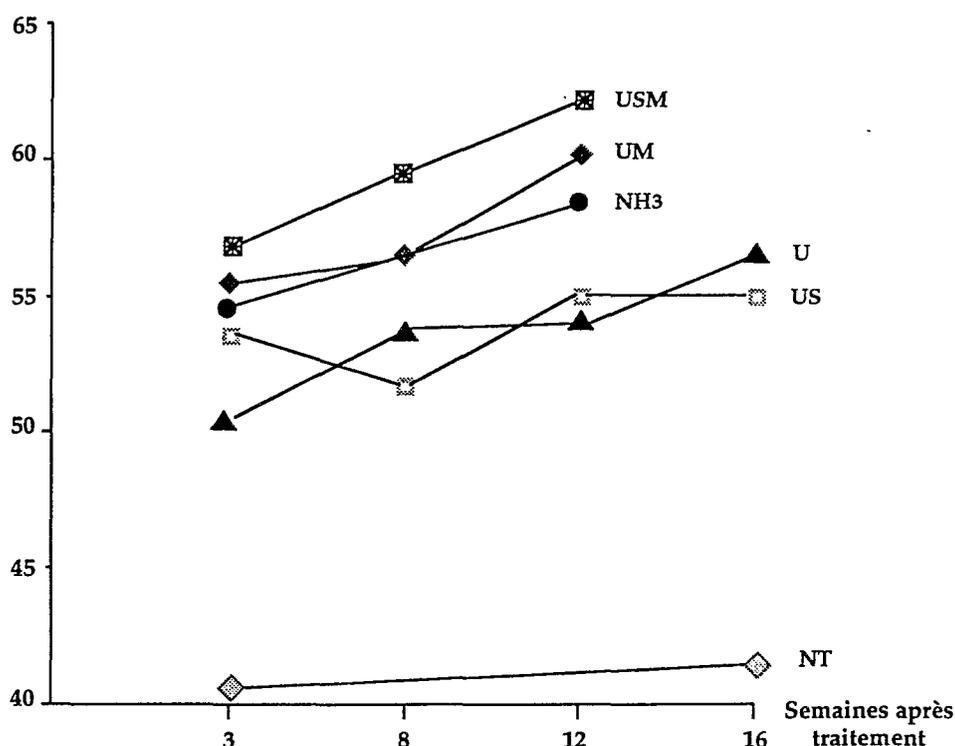


Fig. 3 Evolution de la digestibilité de la matière organique (dmo) après traitement d'une paille de blé traitée à l'urée seule (U) ou additionnée de soja (US), de mélasse (UM) ou de soja et de mélasse (USM). Comparaison avec la paille non traitée (NT) et traitée à l'ammoniac (NH_3).

Homogénéité de l'incorporation de l'urée dans la masse de la paille

La technique la plus simple et la plus fiable est, évidemment, l'aspersion de la solution à l'arrosoir, lit par lit, de la paille hachée en "vrac" en la foulant au pied. Les risques d'erreurs sont nuls si l'on prend garde de bien répartir la solution.

L'aspersion manuelle est également appropriée pour le traitement de la paille conditionnée en balles cubiques de moyenne densité. Le traitement est réalisé en tas, comme pour celui à l'injection d'ammoniac anhydre. L'arrosage est généralement effectué lit par lit. Lawrence *et al.*, dans le cas du Projet CEE/CIHEAM, viennent de

montrer que dans le cas de balles cubiques de moyenne densité, on pouvait n'arroser qu'un lit sur deux, sans nuire ni à l'efficacité ni à l'homogénéité du traitement appréciées par la teneur en N et la digestibilité *in sacco* des différentes couches. Cette technique simplifie les opérations manuelles ; elle a même permis de réduire la quantité d'eau totale à ajouter à 20% du poids de la paille sans adjonction d'uréase. Une observation du même ordre, malheureusement pas accompagnée de mesures de laboratoire, a été effectuée par Chenost *et al.* (à paraître) en Tanzanie où la totalité de la solution devant traiter des tiges de maïs pressées en balles cubiques de moyenne densité a été aspergée avec succès à la rampe d'arrosage en une seule fois sur le sommet et les côtés de meules de 4 couches.

L'aspersion manuelle classique est également possible avec des balles rondes de volume important (2,1 à 3,8 m³) pressées à moyenne densité (105 kg par m³). La solution est appliquée sur la section des balles, disposées verticalement après avoir été introduites dans une gaine de plastique (Besle *et al.*, 1990).

L'incorporation mécanisée directe au champ, de l'eau, de l'urée (et du soja cru) dans la masse de la paille au moment de la fabrication de la paille, a également été l'objet de quelques essais en France (Besle *et al.*, 1990 ; Chenost et Besle, 1992) et, à notre connaissance, en Algérie (Bouaou, communication personnelle) et à Chypre (Hadjipanayotou, communication personnelle). Dans les essais français, les quantités d'eau avaient volontairement été réduites pour diminuer la contrainte et le coût du transport de l'eau sur le champ. C'est ainsi que la teneur en humidité minimum au moment de la fermeture des balles rondes, avait été amenée à 25% moyennant l'adjonction d'une source d'uréase (farine de soja cru) pour garantir une bonne uréolyse. Les résultats (efficacité du traitement) avaient été concluants. Il est vrai, toutefois, que quelques balles (10 à 15%) n'avaient pas pu être traitées de manière homogène. Les pertes ont été notamment observées lorsque l'urée et le soja avaient été introduits séparément sous forme solide au moyen d'un semoir équipé d'une vis sans fin et disposé au-dessus du pick-up, et non pas directement en solution dans l'eau. La difficulté réside, en effet, dans le fait que l'urée en granulé n'est pas, pour des raisons purement mécaniques, toujours introduite de façon proportionnelle à la quantité de paille rentrant dans la presse (en raison de l'irrégularité de la forme et de l'épaisseur de l'andain).

Des observations analogues avaient également été effectuées dans le cas du traitement direct de tiges de maïs (humidité 60%) où l'urée était incorporée par le même dispositif (Chenost *et al.*, 1991). Des pertes d'urée ou des à-coups dans son arrivée sur l'andain et dans la chambre de la presse peuvent survenir et conduire ainsi à des sous ou surdosages. Il serait intéressant de résoudre ces difficultés d'ordre purement machiniste car cette technique est prometteuse, surtout dans le cas du traitement de substrats humides où il n'y a plus qu'à incorporer l'urée sous forme solide.

Diffusion de l' NH_3 et herméticité de l'enceinte

La pression de l' NH_3 généré progressivement au sein de la masse de paille, est moins importante que dans le cas du traitement par injection d' NH_3 anhydre. Aussi, l'herméticité de l'enceinte de traitement est-elle moins importante pour les traitements

à l'urée que pour les traitements à l'ammoniac anhydre. L'ensemble des résultats expérimentaux et des résultats "de terrain" accumulés jusqu'ici, montrent qu'il n'est pas nécessaire de recourir au plastique labellisé de 150 μm d'épaisseur, nécessaire pour le traitement par injection d' NH_3 .

Dans le cas du traitement de paille en "vrac", de volumes réduits (quelques m^3), en fosse ou en petits couloirs, on peut même se borner à l'utilisation de produits locaux (feuilles de banane, boue, sacs d'engrais recousus, etc.) pour tapisser le fond et les bords de la fosse ou de la tranchée et pour recouvrir la masse de paille.

Dans le cas du traitement de paille pressée en balles en tas (meules) de volume plus important, il faudra bien sûr recourir à des films ou bandes de plastique de plus grande taille dont l'importance de l'épaisseur sera toutefois moins grande.

Qu'il s'agisse de paille en "vrac" ou en balles (cubiques ou rondes), la diffusion de l'ammoniac généré est correcte lorsque l'humidité est égale ou inférieure à 50% et que la densité de tassement (ou de pressage) est de l'ordre de 100 à 120 kg par m^3 . C'est celle obtenue classiquement avec le pressage "moyenne densité" des balles cubiques ou rondes ; elle est également de cet ordre dans le cas du tassement au pied de paille en "vrac".

On constate toutefois (Sahnoune, 1990, observations diverses) une condensation, et donc une plus grande fixation d'azote dans les lits supérieurs (sous le film plastique recouvrant la meule) et sur les parois de meules de balles rondes ou cubiques, là où la paille est le plus en contact avec le milieu extérieur et ses variations de température.

Conclusion

Le traitement des pailles dit "à l'urée" peut être réussi de façon efficace si l'on respecte d'abord les conditions permettant une bonne hydrolyse de l'urée en ammoniac. Cette uréolyse, réaction enzymatique, est assurée par l'uréase des bactéries uréolytiques d'origine tellurique, généralement toujours présente. L'uréase de l'équipement enzymatique des pailles peut en effet être limitant, surtout avec des pailles démunies d'adventices. La quantité d'eau à apporter doit être telle que l'humidité de la masse végétale traitée au moment de sa fermeture sous atmosphère hermétique, soit comprise entre 30 et 60% (35 à 40% est un bon compromis). La vitesse et le degré d'uréolyse diminuent lorsque l'humidité diminue. Le recours à des sources d'uréase (soja cru, canavalia, jus de rumen, etc.) ne doit être envisagé que lorsque ce taux d'humidité est inférieur à 25-30% (réduction des quantités d'eau à apporter dans le cas de traitements mécanisés au champ). Le soin à apporter à une parfaite homogénéisation de l'eau, de l'urée et de la source d'uréase dans la paille, est alors de première importance. La vitesse et le degré de l'uréolyse diminuent également lorsque la température diminue ($Q_{10} = 2$, indiquant que le temps de réaction est doublé à chaque diminution de 10°C de la température). La température optimum de la réaction est de 30°C . Il conviendra ainsi de trouver un bon compromis humidité/température/durée pour s'assurer d'une uréolyse, sinon totale, du moins correcte. Des températures inférieures à $10\text{-}15^\circ\text{C}$ sont à éviter.

Le traitement "alcalin" proprement dit (correspondant à des doses de 3 à 5% d' NH_3) suppose des quantités d'urée de l'ordre de 5 à 7% de la paille sèche. Celles-ci sont en général de 5 à 6 kg d'urée par 100 kg de paille brute et ne doivent pas être inférieures à 4 kg. Il n'existe pas une mais des doses d'alcali optimums. Celles-ci varient suivant l'aptitude des pailles à répondre au traitement. Malheureusement les prédicteurs de cette aptitude (indice de saponification de l'extrait tampon phosphate, digestibilité initiale) sont encore mal connus.

L'humidité, la durée et la température requises pour une bonne uréolyse sont en général favorables à une bonne action alcaline de l'ammoniac généré.

La simultanéité de l'uréolyse et du traitement alcalin peut conduire à une moins bonne fixation de l'azote et à une moins bonne efficacité de l'action de l'ammoniac sur les parois végétales. En effet, les produits intermédiaires de l'uréolyse (carbonates et carbamates) peuvent piéger les ions ammonium. La fixation de l'azote, plus rapide que l'évolution de la digestibilité, est d'autant moins bonne que le degré d'humidité est réduit. Ces deux processus sont d'ailleurs améliorés en présence d'uréase.

Un des facteurs pratiques clé de la réussite des "traitements" à l'urée, est une bonne homogénéisation de l'incorporation de l'urée dans la masse végétale à traiter (en solution ou séparément de l'eau dans le cas de substrats secs, en granulés dans le cas de substrats humides). La mécanisation de cette incorporation est possible mais, cependant, encore aléatoire par rapport à l'incorporation manuelle. Elle reste à parfaire, notamment pour les substrats humides où l'urée est apportée sous forme solide. La bonne diffusion de l'ammoniac au sein de la masse suppose une herméticité correcte (moins rigoureuse toutefois que pour l'ammoniac anhydre), une densité moyenne de pressage (100 à 120 kg par m^3), si la paille est pressée, et des humidités maxima de 50 à 60%.

Références

- ALIBES, X., MUÑOZ, F. et FACI, R. (1983). Treated straw for animal feeding. Some results from the Mediterranean area. OECD Workshop, G.R.I., Hurley, Royaume Uni, 15-17 février.
- BESLE, J.M., SIGNORET, C., CHENOST, M., AUFRERE, J. et JAMOT, J. (1989). Prediction of organic matter digestibility of ammoniated and untreated straw by densitometry : comparison with other predictors. Dans : Evaluation of straws in Ruminant Feeding. Chenost, M. et Reiniger, P. (eds). Elsevier, Amsterdam.
- BESLE, J.M., CHENOST, M., TISSERAND, J.L., LEMOINE, J.P., FAURIE, F., SALEH, H. et GRENET, N. (1990). Ammoniation of straw by urea : extent of ureolysis and improvement of nutritive value with moderate water addition. *Reprod. Nutr. Dev.*, suppl. 2, 174s.
- BESLE, J.M., ZWAENEPOEL, P., CHENOST, M., BEAULIEU, G., TISSERAND, J.L., FAURIE, F. et GRENET, N. (1990). Ammoniation of straw by urea : influence of

- addition of soyabeans and/or molasses on characteristics of treatment. *Reprod. Nutr. Dev. suppl.* 2, 175s.
- CHENOST, M., GAILLARD, F. et BESLE, J.M. (1991). Les cannes de maïs dans l'alimentation des ruminants. Conservation à l'ammoniac et à l'urée et valeur alimentaire. *Productions Animales, INRA* 4(2) : 169-175.
- CHENOST, M. et BESLE, J.M. (1992). Les pailles traitées à l'ammoniac provenant de l'hydrolyse de l'urée dans l'alimentation de génisses de race laitière en croissance hivernale. *Ann. Zootech.* 41 (à l'impression).
- CHENOST, M. ROYER, V., CENTRES, J.M., GAILLARD, F. et DAVIS, J. (à paraître). Le traitement de tiges de maïs à l'urée et leur utilisation pour la production laitière dans la région productrice de café et de banane de Tanzanie. *Rev. Elev. Med. Vet. Trop.*
- COLUCCI, P.E., FALK, D., MAC LEOD, G.K. et GRIEVE, D.G. (1992). *In situ* organic matter degradability of untreated and urea-treated varieties of spring barley and oat straws, and of untreated varieties of winter wheat straws. *Anim. Feed. Sci. Technol.* 37 : 73-84.
- CORDESSE, R. (sous presse). Conditions de l'uréolyse. Dans : Les pailles dans l'alimentation des ruminants en zone méditerranéenne. Options Méditerranéennes, Série B, CIHEAM/IAMZ, Saragosse.
- DIAS DA SILVA, A.A., CRISTINA GHEDES, V.M. (1990). Variability in the nutritive value of straw cultivars of wheat, rye and triticale and response to urea treatment. *Anim. Feed. Sci. Technol.* 28 : 79-89.
- HASSOUN, PH. (1987). Amélioration de la valeur nutritive de la bagasse de canne à sucre par un traitement à l'ammoniac (généré par hydrolyse de l'urée) et son utilisation par les ruminants. Thèse de Doctorat. Université des Sciences et Techniques du Languedoc, Montpellier, 225 pp.
- JAYASURIYA, M.C.N. et PERERA, H.G.D. (1982). Urea-ammonia treatment of rice straw to improve its nutritive value for ruminants. *Agricultural Waste* 4 : 143-150.
- JAYASURIYA, M.C.N. et PEARCE, G.R. (1983). The effet of urease enzyme on treatment time and the nutritive value of straw treated with ammonia as urea. *Anim. Feed. Sci. Technol.* 8 : 271-281.
- KIANGI, E.M.I., KATEGUILE, J.A. et SUNDSTØL, F. (1981). Different sources of ammonia for improving the nutritive value of low quality roughages. *Anim. Feed. Sci. Technol.* 6 : 377-386.
- LAN, M.M. et VAN SOEST, P.J. (1981). Titrable groups and soluble phenolic compounds as indicators of the digestibility of chemical treated roughages. *Anim. Feed. Sci. Technol.* 6 : 123-131.
- SAHNOUNE, S. (1990). Le traitement des pailles à l'ammoniac produit par l'hydrolyse

de l'urée. Thèse de Doctorat. Université Blaise Pascal, USR Sciences Clermont II, 117 pp.

SAHNOUNE, S., BESLE, J.M., CHENOST, M., JOUANY, J.P. et COMBES, D. (1991). Ammoniation of straw via the hydrolysis of urea. 1. Ureolysis in low water medium. Anim. Feed. Sci. Technol. 34 : 75-93.

SCHIERE, J.B. et IBRAHIM, M.N.M. (1989). Feeding of urea-ammonia treated rice straw. Pudoc, Wageningen, 125 pp.

SUNDSTØL, F., COXWORTH, E.C., MOWAT, D.N. (1978). Amélioration de la valeur nutritive de la paille par le traitement à l'ammoniac. Revue mondiale de Zootechnie, 26 : 13-21.

SUNDSTØL, F. et COXWORTH, E.M. (1984). Ammonia treatment. Dans : Straw and other fibrous by-products as feed. Sundstøl, F. et Owen, E. (eds), 7 : 196-247. Elsevier, Amsterdam.

WILLIAMS, P.E.V., INNES, G.M. et BREVER, A. (1984a). Ammonia treatment of straw via the hydrolysis of urea. I. Effects of dry matter and urea concentrations on the rate of hydrolysis of urea. Anim. Feed. Sci. Technol. 11 : 103-113.

WILLIAMS, P.E.V., INNES, G.M. et BREVER, A. (1984b). Ammonia treatment of straw via the hydrolysis of urea. II. Additions of soya bean (urease), sodium hydroxide and molasses ; effects on the digestibility of urea-treated straw. Anim. Feed. Sci. Technol. 11 : 115-124.