

DRÊCHES DE BLÉ

COPRODUIT DE LA DISTILLATION D'ALCOOL À PARTIR DES GRAINS DE BLÉ, LES DRÊCHES DE DISTILLERIE DE BLÉ PEUVENT SE PRÉSENTER SOUS DES FORMES HUMIDES OU SÈCHES. ELLES PRÉSENTENT UNE BONNE TENEUR EN PROTÉINES, CE QUI PERMET UNE VALORISATION EN RUMINANTS ET EN MONOGASTRIQUES.

AUTRES NOMS COMMUNS

Drêches de blé de distillerie, drêches de distillerie, DDGS de blé - Drêches, drêches de distillerie humides, WDG - Drêches de distillerie déshydratées, DDG - Drêches de distillerie humides et solubles, WDGS, DWGS- Drêches de distillerie et solubles déshydratés, WDGS - Solubles condensés de distillerie (CDS), solubles déshydratés de distillerie (DDS)



Description

Les drêches de blé de distillerie sont le principal coproduit de la distillation d'alcool à partir de grains de blé. Les distilleries produisent des boissons alcoolisées, de l'éthanol industriel et du bioéthanol (biocarburant), ainsi que les coproduits suivants (les définitions sont fournies dans la partie **Procédés de transformation**) :

- Drêches de blé de distillerie humides (WDG), drêches et solubles de blé de distillerie humides (WDGS)
- Drêches de blé de distillerie déshydratées (DDG), drêches et solubles de blé de distillerie déshydratés (DDGS)
- Solubles de distillerie condensés (CDS), solubles de distillerie déshydratés (DDS)

Il existe deux principaux procédés de distillerie, par voie sèche et voie humide. La voie sèche (mouture des grains à sec) est le principal procédé utilisé pour la production d'éthanol. Ce procédé commence par un broyage (avant addition d'eau), et il produit de l'éthanol et différents coproduits. Au cours du procédé dit de voie humide (mouture des grains humidifiés), les grains sont d'abord imbibés d'eau, puis fractionnés pour donner de nombreux produits utilisés en alimentation humaine ou dans l'industrie tels que de l'amidon, des protéines, du fructose, de l'huile ou de l'éthanol. Ce procédé, qui peut durer de façon ininterrompue pendant plusieurs mois, permet d'obtenir des quantités d'éthanol plus importantes que la voie sèche, tout en diminuant les coûts, le travail et les quantités de levures nécessaires (Graybosch et al., 2009). La production d'éthanol par voie humide produit de nombreux coproduits tels que le gluten de blé, le gluten feed de blé et la farine de germe de blé. Ces coproduits représentent 25-30 % du chiffre d'affaires de la chaîne de valeur de l'éthanol (Graybosch et al., 2009 ; Cozannet et al., 2009b). Bien que des définitions officielles et commerciales existent pour les différents coproduits de distillerie du blé,

les frontières entre ces produits sont parfois floues. En particulier, la quantité de solubles incorporée dans les drêches peut être très variable (Newkirk, 2011) et la présence de solubles n'est souvent pas spécifiée dans les études nutritionnelles. Cependant, on peut supposer que les drêches de blé de distillerie commercialisée contiennent généralement des solubles (DGS).

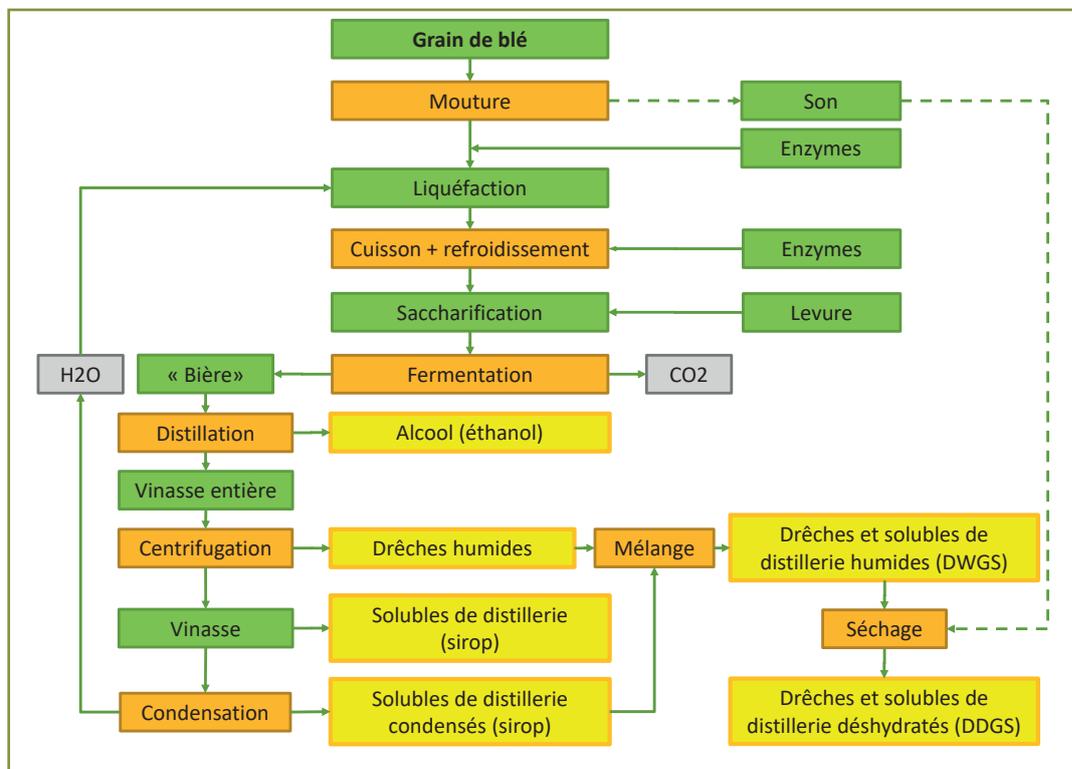
Cette fiche traite principalement des drêches de blé résultant de la production d'éthanol par voie sèche (Graybosch et al., 2009). La disponibilité des drêches et solubles de blé de distillerie a considérablement augmenté depuis les années 1990, en raison de la demande croissante de biocarburants provoquée par les préoccupations environnementales et les règlements qui en découlent. En Europe, la directive européenne 2009/28 /CE a fixé pour objectif l'utilisation de 10 % d'énergie renouvelable dans les transports pour chaque État membre en 2020 (Union européenne, 2009). Alors que les États-Unis subviennent principalement à leurs besoins en éthanol grâce à leur production de maïs, en Europe, au Canada et en Australie, le blé est la principale matière première disponible pour les biocarburants (Moreau et al., 2011 ; Newkirk, 2011). Les coproduits de distillerie de blé, tels que les drêches de blé, sont ainsi principalement produits dans ces régions (Piron et al., 2009). Tandis que les drêches de blé sont le principal coproduit de la production d'éthanol de blé par voie sèche, la voie humide donne des produits de haute valeur ajoutée tels que le gluten de blé (utilisé en boulangerie, et comme émulsifiant ou épaississant), le son de blé (utilisé dans les aliments à base de céréales), ou les germes de blé (utilisés en boulangerie et dans des produits cosmétiques à haute valeur ajoutée), ainsi que de la farine (Tibelius et al., 1996).

Les coproduits de distillerie ont une longue histoire dans l'alimentation du bétail. Considérés autrefois comme des déchets, ils étaient jetés dans les décharges et les rivières, et parfois vendus à bas prix aux agriculteurs locaux pour l'alimentation animale (Lyons, 2003). La première étude sur l'utilisation de drêches de distillerie dans une ration pour bovins a été publiée en 1907 (Weiss et al., 2007). Les drêches de blé de distillerie sont des aliments intéressants, généralement plus riches en protéines que les drêches de maïs de

distillerie, mais contenant moins de matières grasses et plus de fibres, et qui peuvent être offertes à toutes les catégories d'animaux d'élevage (Hayes, 2008). Comme les drêches de maïs, les drêches de blé ont d'abord été utilisées pour l'alimentation des ruminants, mais, en raison de leur plus grande disponibilité et d'une meilleure connaissance de

leur valeur nutritive, elles sont de plus en plus utilisées pour les monogastriques, notamment les porcs (Newkirk, 2011 ; Stein et al., 2009 ; Cozannet et al., 2009a). Les drêches de blé peuvent être utilisées comme engrais car elles constituent une bonne source de minéraux (N, P et autres) à libération lente (Schoenau, 2011).

Figure 1 : schéma du process de fabrication du blé



Distribution

La production d'éthanol de blé a utilisé 6,3 millions de tonnes de blé dans le monde en 2010, et cette quantité devrait s'élever à 15 millions de tonnes en 2020 (OCDE-FAO, 2013). Une tonne de blé transformé en éthanol donnant environ 372 litres d'éthanol et entre 295 et 400 kg de drêches de blé (à 10 % d'humidité), la production mondiale de drêches

de blé en 2010 peut être estimée à environ 1,9 -2,5 millions de tonnes en 2010 et devrait atteindre 4.4-6 millions de tonnes en 2020 (Désialis, 2013 ; Bonnardeaux, 2007). En 2010, la France et le Canada ont été les principaux producteurs de drêches de blé avec 0,56 et 0,5 millions de tonnes respectivement (OCDE-FAO, 2013 ; Marouby et al., 2009).

Procédés de transformation

Procédés de fabrication d'éthanol

Dans la première étape du procédé par voie sèche (mouture à sec), le grain est soit broyé soit moulu pour produire une farine dépourvue de son. Les grains moulus, ou la farine, sont ensuite mélangés avec de l'eau et des enzymes (amylases), afin de produire un moût où l'hydrolyse de l'amidon se produit (étape de liquéfaction). Ce moût est cuit pour tuer les bactéries productrices d'acide lactique indésirable. Les enzymes sont ajoutées au moût afin de transformer l'amidon en dextrose (étape de saccharification). Après la saccharification, la levure est ajoutée pour démarrer le processus de fermentation qui produit une « bière » et du CO₂. La « bière » passe par une colonne de distillation en continu à la tête de laquelle l'alcool est produit. Le produit qui reste au fond (vinasse entière) est centrifugé pour séparer les drêches de la vinasse. Si le son a été enlevé du grain avant la fermentation, on peut l'ajouter aux drêches humides. Avec certains procédés, les graisses et les fibres sont éliminées dans les premières étapes du procédé, et les protéines sont concentrées dans les drêches déshydratées finales qui sont alors appelées drêches déshydratées à haute teneur en protéine (HPDG) (Newkirk, 2011).

Les drêches humides peuvent être directement distribuées au bétail. Elles peuvent aussi être séchées pour en faire des drêches de distillerie déshydratées (DDG). Les vinasses peuvent être vendues comme aliment humide, ou être déshydratées pour produire des solubles de distillerie condensés qu'on appelle aussi « sirops » (CDS). Les solubles condensés et les drêches de distillerie sont souvent mélangés ensemble pour préparer des drêches et solubles de distillerie humides ou déshydratés (WDGS ou DDSS) (Newkirk, 2011). Lorsque du son est réincorporé à la fin du procédé, les drêches contiennent plus d'amidon. Lors de la production d'éthanol, le processus de fermentation produit 3 % de levure et 4 % de glycérol (Hazzledine, 2008) qui peuvent se retrouver dans les drêches et modifier leur composition.

Bien que la fabrication d'éthanol par voie sèche suive le procédé décrit ci-dessus, la nature des produits finaux (boissons, alcool industriel, biocarburants), les savoir-faire locaux et les innovations supposent des adaptations spécifiques qui conduisent à des coproduits de composition variable. Il convient de noter qu'à l'heure actuelle, les drêches de blé de distilleries sont encore en évolution en raison de l'évolution des technologies et de la demande de biocarburants.

Drêches de blé issues de la production de whisky

Le blé est la principale matière première dans certaines distilleries de whisky (Crawshaw, 2004). Le moût est filtré après la liquéfaction, il en résulte un moût liquide et un coproduit solide (le rétentat de filtration) appelé drêche. Le moût liquide subit une fermentation supplémentaire tandis que la drêche est directement séchée ou pressée sans avoir été distillée avant d'être utilisée pour l'alimentation des animaux. L'effluent non alcoolisé qui se trouve au bas de la colonne de distillation est appelé vinasse. Ce produit, qui contient des enzymes et des levures, peut être séché et donne des solubles déshydratés de distillerie.

Les solubles de blé contiennent des xylanes et arabinoxylanes qui ne sont pas décomposés au cours du procédé de transformation. Les solubles de blé sont donc très visqueux. Ils sont, par conséquent, plus difficiles à sécher que les solubles de maïs (Crawshaw, 2004). Les solubles de blé peuvent être

centrifugés afin que les solides puissent ensuite être séchés et transformés en concentré de drêches. A l'instar de ce qui est produit lors de la fabrication d'éthanol, les drêches de blé issues de la production de whisky sont souvent mélangées avec les solubles de blé pour produire des drêches et solubles de blé sombres (Crawshaw, 2004). On notera que le whisky est souvent obtenu à partir de mélanges de différentes céréales comme le maïs, le blé, l'orge et le seigle. Les coproduits ne sont pas des drêches de blé au sens strict. Le whisky single malt est généralement fabriqué à partir d'orge (et parfois de seigle) (Crawshaw, 2004). Dans certaines distilleries d'Ecosse, où le blé est la seule source d'amidon pour le whisky, la valeur nutritive des drêches sombres est significativement plus élevée que celle des drêches sombres de malt (à base d'orge) (Crawshaw, 2004).

Impact environnemental

Coûts énergétiques

Le séchage des drêches et solubles de blé a un coût énergétique élevé : le processus de séchage peut consommer 35 % de l'énergie thermique utilisée dans une usine d'éthanol.

Cependant, les drêches humides s'abîment rapidement et les drêches déshydratées sont préférables malgré leur coût énergétique (Murphy et al., 2008).

Composés organiques volatils

Le séchage des drêches produit des composés organiques volatils qui peuvent causer des problèmes de santé graves. Ces émissions peuvent être réduites en utilisant des unités

de séchage à basse température dans les usines d'éthanol (Bühler, 2013).

Réduction des déchets industriels

L'utilisation des drêches de blé pour l'alimentation du bétail élimine d'énormes quantités de coproduits qui devraient

sans cela, être éliminées par d'autres moyens (Lyons, 2003).

Réduction des émissions de méthane

Il a été montré que les drêches de maïs de distillerie réduisaient les émissions entériques de méthane de 3,2 g eq. CO₂/MJ par tête de bovin (US EPA, 2010). Cette réduction est principalement due à la teneur élevée des drêches de

maïs en matières grasses. Les drêches de blé ne contenant que 4-5 % de matières grasses, cette réduction risque d'être moins importante (Grainger et al., 2011).

Caractéristiques nutritionnelles

Les drêches et solubles de blé déshydratés sont riches en protéines, variant de 30 à 40 % de MS. Ils sont sur ce point similaires aux tourteaux de colza et de tournesol, et un peu supérieurs aux drêches et solubles de maïs de distillerie traditionnels (non « high-protein »). Les drêches et solubles de blé déshydratés contiennent peu d'amidon et de sucres solubles. Lorsque le grain entier (contenant le son) est utilisé pour la fermentation, la teneur en amidon de la drêche est d'environ 4,5 % (base MS). Lorsque le son est éliminé avant la fermentation, et ajouté à nouveau à la fin du procédé, la teneur en amidon a tendance à être beaucoup plus élevée (10-25 % MS), et très variable. Le contenu en NDF des drêches de blé est également variable : les drêches et solubles de blé résultant de la distillation de grains entiers ont une teneur en NDF légèrement supérieure aux drêches issues de grains moulus (qui ne contiennent plus de son) (32 contre 27 % MS). La teneur en matières grasses des drêches de blé est faible (5 % MS), deux fois inférieure à celle des drêches de maïs. Comme les solubles de blé sont riches en matières grasses (jusqu'à 34 %) et pauvres en NDF, plus on ajoute de solubles aux drêches de blé, plus la teneur en matières grasses est élevée et plus la teneur en fibre est basse (Newkirk, 2011).

La composition des drêches de blé est beaucoup plus variable que celle du grain d'origine. En plus de la variabilité provenant du grain lui-même (cultivar, conditions de croissance), il existe de grandes différences entre les usines d'éthanol en raison de la méthode de préparation des grains (broyage humide ou broyage à sec), du procédé de fermentation (type d'enzymes et souches de levure), de la quantité de solubles (plus riches en protéines) mélangés aux drêches de distillerie, de la durée et température de séchage, ainsi que d'éventuels autres fractionnements (séparation des protéines, etc.) des fractions non amylacées (Cozannet et al., 2010a ; Kalscheur et al. 2012 ; Newkirk, 2011). Comme indiqué précédemment, la réintroduc-

tion du son lors du séchage donne un produit contenant plus d'amidon et moins de fibres. L'ajout de solubles augmente la teneur en matières grasses et abaisse le NDF (Newkirk, 2011). Le mélange de départ des différentes céréales contribue également à la composition finale des drêches. Dans certaines usines d'éthanol, blé et maïs sont mélangés avant la distillation, ce qui modifie les teneurs en protéines, phytates et énergie du coproduit final (Newkirk, 2011).

Une autre source de variabilité est la détérioration par la chaleur qui se produit pendant le séchage. Des drêches de blé ayant subi des températures de traitement élevées auront une dégradabilité des protéines réduite chez les ruminants et une disponibilité en acides aminés inférieure chez les monogastriques. En fonction de la composition, et plus notamment du séchage, la couleur des drêches de blé peut varier du jaune clair au brun foncé. Par exemple, les valeurs de luminance (L) de 10 drêches de blé européennes allaient de 43 (produits noirs) à 63 (produits jaunes) dans l'étude de Cozannet et al., 2010c. Les auteurs suggèrent que les drêches de blé présentant des valeurs de L inférieures à 50 (sombres) ont subi de trop fortes températures et présentent une fréquence élevée de réactions de Maillard. L'obscurcissement des drêches est un indicateur de hautes températures, c'est pourquoi les drêches de couleur claire devraient être préférées en monogastriques. En effet, leur teneur en acides aminés et la disponibilité de ceux-ci sont potentiellement plus élevées (Noblet et al., 2012). Le profil en acides aminés des drêches de blé est en partie similaire à celui du grain initial. Cependant, les levures utilisées pour la fermentation de l'amidon représentent une source de protéines supplémentaire, équivalente à environ 5 % de la teneur totale en protéines des drêches (Ingledew, 1993). De plus, les quantités de solubles ajoutés dans les drêches de distillerie peuvent être variables et influencer la teneur en protéines et le profil d'acides aminés. En dépit de ces sources potentielles de

variabilité, les profils d'acides aminés du blé et des drêches de blé sont tout à fait comparables, à l'exception des teneurs en lysine et arginine, qui sont plus faibles pour les drêches de blé. Les taux de lysine et d'arginine dans la protéine brute sont très variables, même dans les drêches de couleur claire : de 1,7 à 3,0 % et de 3,7 à 4,6 % respectivement, dans l'étude de Cozannet et al., 2010a. Contrairement au blé ou à ses coproduits de broyage, il n'y a pratiquement pas de corrélation entre les teneurs en lysine/arginine (exprimées en % MS) et la teneur en

protéines brutes des drêches de blé, si bien que la teneur en protéine ne saurait être utilisée comme un indicateur unique des teneurs en lysine ou arginine dans ces coproduits (Noblet et al., 2012).

Les minéraux sont trois fois plus concentrés dans les drêches que dans le grain de blé. Le phosphore est moins lié à l'acide phytique que dans le grain de blé, et est plus disponible pour les porcs et les volailles.

Tableau 1 : Principaux constituants des drêches de blé de distillerie déshydratées

		Amidon < 7 %	Amidon > 7 %
Constituants organiques	Matière sèche (% sur brut)	91,3	91,9
	Protéines brutes (% MS)	35,8	32,6
	Cellulose brute (% MS)	7,8	6,0
	NDF (% MS)	35,1	30,8
	ADF (% MS)	14,0	8,7
	Lignine (% MS)	5,4	3,4
	Matières grasses brutes (% MS)	5,4	4,6
	Matières grasses hydrolyse (% MS)	-	-
	Cendres (% MS)	5,7	5,4
	Amidon (% MS)	4,1	12,1
	Sucres totaux (% MS)	3,0	5,9
	Energie brute (kcal/kg MS)	4 910	4 810
	Minéraux	Calcium (g/kg MS)	1,6
Phosphore (g/kg MS)		8,7	8,6
Potassium (g/kg MS)		12,5	8,8
Sodium (g/kg MS)		4,42	0,56
Magnésium (g/kg MS)		3,4	3,0
Manganèse (mg/kg MS)		74	84
Zinc (mg/kg MS)		130	55
Cuivre (mg/kg MS)		10	9
Fer (mg/kg MS)		140	84
Acides aminés	Alanine (g/kg MS)	13,0 (soit 3,6 g/16 gN)	12,0 (soit 3,8 g/16 gN)
	Arginine (g/kg MS)	15,3 (soit 4,1 g/16 gN)	14,3 (soit 4,5 g/16 gN)
	Acide aspartique (g/kg MS)	17,7 (soit 4,8 g/16 gN)	16,4 (soit 5,2 g/16 gN)
	Cystine (g/kg MS)	7,1 (soit 2,0 g/16 gN)	6,2 (soit 1,9 g/16 gN)
	Acide glutamique (g/kg MS)	92,1 (soit 26,1 g/16 gN)	83,7 (soit 25,7 g/16 gN)
	Glycine (g/kg MS)	14,2 (soit 4,0 g/16 gN)	12,8 (soit 4,1 g/16 gN)
	Histidine (g/kg MS)	7,4 (soit 2,0 g/16 gN)	6,8 (soit 2,1 g/16 gN)
	Isoleucine (g/kg MS)	12,4 (soit 3,5 g/16 gN)	11,2 (soit 3,6 g/16 gN)
	Leucine (g/kg MS)	23,2 (soit 6,5 g/16 gN)	21,0 (soit 6,7 g/16 gN)
	Lysine (g/kg MS)	7,5 (soit 1,9 g/16 gN)	6,8 (soit 2,3 g/16 gN)
	Méthionine (g/kg MS)	5,5 (soit 1,5 g/16 gN)	5,0 (soit 1,5 g/16 gN)
	Phénylalanine (g/kg MS)	16,0 (soit 4,5 g/16 gN)	14,2 (soit 4,4 g/16 gN)
	Proline (g/kg MS)	22,7 (soit 8,6 g/16 gN)	20,7 (soit 9,0 g/16 gN)
	Sérine (g/kg MS)	15,8 (soit 4,4 g/16 gN)	14,7 (soit 4,6 g/16 gN)
	Thréonine (g/kg MS)	11,2 (soit 3,0 g/16 gN)	10,5 (soit 3,2 g/16 gN)
	Tryptophane (g/kg MS)	3,8 (soit 1,0 g/16 gN)	3,5 (soit 1,2 g/16 gN)
	Tyrosine (g/kg MS)	10,6 (soit 2,9 g/16 gN)	9,7 (soit 3,0 g/16 gN)
Valine (g/kg MS)	15,5 (soit 4,3 g/16 gN)	14,2 (soit 4,5 g/16 gN)	

Contraintes potentielles

Risques toxiques liés aux sulfates

En raison de l'utilisation d'acide sulfurique dans le procédé de fabrication, les coproduits d'éthanolerie peuvent avoir des teneurs élevées en sulfates (0,5 à 1,7 % MS) (McAloon et al., 2000), et augmentent le risque de toxicose au soufre chez les animaux recevant de grandes quantités de drêches de distillerie. Une forte concentration d'H₂S inhibe les pro-

cessus d'oxydation dans le tissu nerveux et provoque des désordres au niveau du système nerveux central, appelés polioencéphalomalacie, qui peuvent affecter jusqu'à 6 % des bovins nourris avec des aliments contenant plus de 0,56 % de soufre (Gould, 1998 ; Vanness et al., 2009).

Aflatoxines

Les blés destinés à la production d'éthanol doivent être dépourvus d'ergot, de fusarium ou de vomitoxine. Ces impuretés ne se décomposent pas pendant la production d'éthanol

et leurs concentrations peuvent être multipliées par trois dans les drêches (Newkirk, 2011).

Cuivre

Certaines distilleries de whisky traditionnelles utilisent des alambics et des tuyauteries en cuivre (plutôt qu'en acier inoxydable), et leurs coproduits ont tendance à contenir des niveaux élevés de cuivre, lequel est toxique pour les ovins. Les drêches sombres de maïs, par exemple, peuvent contenir entre 15 et 120 mg de cuivre par kg. En raison de la grande

variabilité de la teneur en cuivre et de la biodisponibilité du cuivre dans les drêches de malt, il est essentiel de vérifier les niveaux de cuivre avant d'acheter ces drêches si elles doivent être distribuées à des ovins (Lewis, 2002). Le cuivre n'est pas un problème si la production d'éthanol est industrielle car les installations sont alors en acier inoxydable.

Ruminants

Les drêches de blé constituent une bonne source d'énergie

et de protéines by-pass pour les ruminants.

Valeur énergétique

Dans les tables INRA-AFZ, la teneur en EM (Energie métabolisable) des drêches de blé varie de 2990 (amidon < 7 % sur brut) à 3130 kcal/kg MS (amidon > 7 % sur brut) (Sauvant et al., 2004). La digestibilité des drêches et solubles (DDGS) de blé ou de mélanges blé/orge déshydratés était de 76, 50 et 87 % pour la matière organique, la cellulose brute et les matières grasses, respectivement, résultant en une EM de 2890 kcal/kg MS, et une ENlactation de 1745 kcal/kg MS (Losand et al., 2009). La teneur en NDF non digestible est le déterminant majeur de la digestibilité de la matière organique. Une étude in sacco a rapporté que les drêches de blé contenaient 12 % de NDF indigestible, valeur proche

de celles du tourteau de colza (12 % MS) et du tourteau de coton (10 % MS), mais beaucoup plus élevée que celles des drêches de maïs (5 % DM) et du tourteau de soja (proche de zéro) (Chapoutot et al., 2010). Dans une étude comparative, la dégradabilité ruminale du NDF était la plus élevée pour les drêches de seigle (47 %), intermédiaire pour les drêches de blé et de triticale (45 %) et la plus basse pour les drêches d'orge (34 %) (Mustafa et al., 2000). Bien que les drêches de blé ne semblent pas induire d'interactions digestives, l'ajout de drêches de blé à une ration de finition à base d'orge a réduit les valeurs de digestibilité de la MO, sans effet sur la teneur en ED (Energie digestible) (Walter et al., 2012).

Valeur protéique

Dans une comparaison de différentes céréales pour la production d'éthanol, la dégradabilité effective des protéines des drêches de blé (54 %) a été jugée similaire à celles des drêches de seigle et des drêches de triticale (54 et 51 %), respectivement et significativement supérieure à celle des drêches d'orge (49 %).

Les drêches de blé sont, avec les drêches de maïs et le tourteau de soja, l'une des meilleures sources de protéines by-pass, supérieures à tous les tourteaux d'oléagineux non traités (Nuez-Ortin et al., 2010). Dans une méta-analyse portant sur une base de données de dégradabilité des protéines, la dégradabilité théorique des protéines (taux de passage de 6%/h) pour les drêches de blé était de 56 ± 5 % (n = 12). Cette valeur est inférieure à celle du tourteau de colza (73 ± 6 %, n = 3) et du gluten de maïs (70 ± 6 %, n = 9), mais similaire à celle du tourteau de soja (59 ± 5 %, n = 8) et supérieure à celle des drêches de maïs (46 ± 4 %, n = 14), des drêches de brasserie séchées (43 ± 6 %, n = 4) et du tourteau de soja traité au formaldéhyde (33 ± 9 %, n = 2) (Chapoutot et al., non publié). Les drêches de blé constituent également une bonne source de protéines dégradables dans le rumen : des drêches de blé utilisées pour compléter un régime de finition à base d'orge ont linéairement augmenté les concentrations en azote ammoniacal (NH₃-N) dans le rumen, et l'excrétion d'azote (McKeown et al., 2010a ; Walter et al., 2012).

La digestibilité apparente de la protéine des drêches de blé dans le petit intestin (déterminé par une technique des sachets nylon, Yue Qun et al., 2007), a été évaluée à 90 %.

Cette valeur est inférieure à celle du tourteau de soja ou du tourteau d'arachide (96 %), similaire à celle du gluten de maïs (91 %) et du maïs (90 %), mais supérieure à celle du tourteau de coton (81 %), du tourteau de colza (82 %) et des drêches de brasserie (74 %), et nettement supérieure à celle du foin de luzerne (40 %) et de la paille de maïs (36 %). Les tables INRA-AFZ (Sauvant et al., 2004) et la méta-analyse de Chapoutot et al. (non publiée) ont rapporté les valeurs suivantes de digestibilité apparente des protéines dans l'intestin grêle : drêches de blé (85 et 93 %) ; drêches de maïs (90 et 93 %) ; tourteau de soja (96 et 98 %) ; tourteau de coton (90 et 86 %) ; tourteau de colza (79 et 70 %). On peut donc conclure que les protéines by-pass des drêches de blé ont une bonne digestibilité intestinale et constituent l'une des meilleures sources de protéines métabolisables. Il faut noter que la protéine by-pass des drêches de blé est pauvre en lysine, comme celle des autres drêches de distillerie, ce qui pourrait limiter les performances des animaux dans certaines situations. Une étude a rapporté que des drêches issues d'un mélange blé/maïs était une meilleure source de protéines vraies digérées et absorbées dans le petit intestin que les drêches de blé ou de maïs prises séparément (Nuez-Ortin et al., 2010).

Dans une étude *in vitro* les rations contenant des drêches de blé ont produit plus d'azote microbien et de matière sèche microbienne que les rations de contrôle ou à base de drêches de maïs. Cependant, cette différence était trop faible pour modifier la croissance des agneaux (O'Hara et al., 2011). Un effet semblable a été observé chez les bovins (Li Chun et al., 2012).

Excrétion de phosphore

L'apport de drêches à raison de 20 à 40 % dans la ration de génisses augmente l'excrétion de phosphore et peut poser un problème d'équilibre nutritionnel qui doit être pris

en compte par les éleveurs (Walter et al., 2012). Ces observations sont aussi faites pour les agneaux en croissance (McKeown et al., 2010a).

Bovins Les bovins en croissance et finition sont les princi-

● ● Bovins en croissance et finition

paux utilisateurs de drêches de blé, au Canada en particulier (Newkirk, 2011). L'augmentation du niveau de drêches de blé dans la ration augmente linéairement l'ingestion, et réduit le rapport gain de poids/aliment, mais n'a aucun effet sur le gain moyen quotidien (Gibb et al., 2008). Les drêches de blé ont une valeur nutritive semblable à celle de l'orge lorsqu'elles sont incorporées à 20 % (base MS), mais leur digestibilité et leur teneur en énergie ont diminué à des niveaux plus élevés d'incorporation (Gibb et al., 2008). Le remplacement de l'orge par des drêches de maïs ou de blé jusqu'à 40 % de la ration (base MS) a conduit à de meilleures performances avec une efficacité alimentaire accrue et sans effet négatif sur le rendement ou la qualité de carcasse chez les génisses (Walter et al., 2012). De même,

des bovins en croissance ont pu recevoir des drêches de blé en remplacement d'orge sans perturbation de l'efficacité alimentaire (Holtshausen et al., 2011). Chez les génisses, un régime à base de paille + foin de brome, complété par des drêches de blé, un mélange soja-colza ou encore du colza seul, n'a pas modifié l'ingestion, le taux de passage ou la digestibilité. Des études supplémentaires sont nécessaires pour évaluer la faisabilité d'utiliser ces aliments à des niveaux plus élevés dans les régimes à base de fourrages pour bovins (Kerckhove et al., 2011). Les drêches de triticale n'ont pas altéré la qualité de la carcasse ou de la viande des animaux, mais a augmenté les acides gras omega-3 et diminué la teneur de la viande en acides gras trans (He et al., 2012).

●● Effets sur le comportement alimentaire et la digestion des bovins

Des quantités modérées de drêches de blé ont été utilisées pour remplacer à la fois l'orge grain et l'ensilage, afin de répondre aux besoins en énergie et en fibres des bovins en finition. Toutefois, lorsque la quantité d'ensilage est très faible (moins de 10 %), les drêches de blé ne constituent pas une source de fibres efficace : elles ont diminué le pH du rumen, même si la teneur en amidon rapidement fermentescible de la ration a été considérablement réduite (Li et al., 2011). Lorsque l'orge a été remplacée par des drêches de blé et de maïs DDG dans des rations pour bovins de boucherie

en croissance, le comportement alimentaire et l'incidence de l'acidose ruminale sont restés inchangés (Holtshausen et al., 2011). L'augmentation du taux d'incorporation des drêches de blé dans une ration de finition à base d'orge a provoqué la baisse des niveaux de propionate du rumen, tandis que le niveau de butyrate a augmenté (Walter et al., 2012). Le remplacement de l'orge par 40 % de drêches de blé ou de maïs DSDS n'a pas amélioré le pH du rumen en cas d'acidose légère à modérée chez des génisses recevant une ration de finition à base d'orge (Walter et al., 2012).

●● Vaches laitières

En raison de leur teneur en protéines, les drêches de blé peuvent être utilisées comme substitut au tourteau de colza et même parfois au tourteau de soja. Des études ont montré que cette substitution ne modifie ni la fermentation ruminale, ni la production de protéines microbiennes, ni la production de lait (Azarfar et al., 2013 ; Abdelqader et al., 2013. ; Chibisa et al., 2012. ; Franke et al., 2009 ; Penner et al., 2009). La substitution partielle d'aliments concentrés par des drêches de blé n'a généralement pas d'incidence sur la production de lait, la composition du lait ou l'activité masticatoire (Penner et al., 2009). Toutefois, lorsque les drêches de blé sont utilisées comme substitut au fourrage, elles ne favorisent pas l'activité de mastication dans la même mesure que l'ensilage d'orge, et il en résulte un plus

faible taux de matières grasses dans le lait et un risque plus élevé d'acidose ruminale (Penner et al., 2009). Le remplacement partiel de l'ensilage d'orge avec des drêches de blé a amélioré la productivité des vaches laitières en lactation, mais a diminué le temps de mastication, le pH du rumen, et la concentration en matières grasses du lait. Cette réponse n'a pas été améliorée par l'ajout de foin de luzerne (Zhang et al., 2010).

Apporter des quantités croissantes de drêches de blé peut modifier le profil en acides gras du lait. L'augmentation du taux de drêches a augmenté linéairement les concentrations d'acides linoléiques conjugués cis-9, trans-11, trans-13, C18: 1 trans-11, et d'acides linoléiques conjugués totaux (Chibisa et al., 2013).

O vins

Des drêches de blé et des drêches de triticale ont remplacé un mélange d'orge et de tourteau de colza à hauteur de 20 % dans la ration (base MS) d'agneaux en croissance sans affecter l'ingestion de MS, les gains moyens quotidiens ou les caractéristiques de carcasse (McKeown et al., 2010b). L'incorporation de drêches de triticale a amélioré le profil en acides gras de la graisse sous-cutanée (McKeown et al., 2010b). Chez des agneaux, on a pu remplacer jusqu'à 60 % de l'orge par des drêches de triticale sans nuire aux perfor-

mances de croissance ou aux caractéristiques de carcasse (McKeown et al., 2010a). Pour des agneaux en finition, le remplacement du tourteau de colza et d'une partie de l'orge par 20 % (base MS) de drêches de blé ou de drêches de maïs à haute ou faible teneur en huile, a maintenu le rumen en bon état de fonctionnement, et a conduit à de bonnes performances de croissance et de bonnes caractéristiques de carcasse (O'Hara et al., 2011).

Tableau 2 : Valeurs alimentaires des drêches de blé de distillerie déshydratées destinées aux ruminants

	Amidon < 7 %	Amidon >7 %
Digestibilité de la matière organique (%)	77,0	81,0
Digestibilité de l'énergie (%)	-	-
Energie digestible (kcal/kg MS)	3 770	3 870
Energie métabolisable (kcal/kg MS)	2 940	3 060
UFL (/kg MS)	1,06	1,11
UFV (/kg MS)	1,01	1,08
Digestibilité de l'azote (%)	76	76
Dégradabilité théorique de l'azote (k=6%) (%)	68	77
Digestibilité intestinale de l'azote (%)	85	85
PDIA (g/kg MS)	108	71
PDIN (g/kg MS)	241	211
PDIE (g/kg MS)	157	131

Les drêches de blé sont à la fois sources d'énergie et de protéines pour les porcs, et elles peuvent être incorporées jusqu'à 25-30 % dans les régimes pour porcs en finition et truies gestantes. Cependant, chez les porcelets et, dans une moindre mesure, chez les porcs en croissance, l'incorporation de drêches à des niveaux supérieurs à 15 % peut réduire l'ingestion et la croissance, en particulier lorsque les drêches présentent une faible disponibilité de la lysine (Thacker, 2006 ; Widyaratne et al., 2007 ; Avelar et al., 2010 ; Newkirk, 2011). Chez les truies en lactation, lorsque l'objectif est de maximiser l'ingestion, il est recommandé d'utiliser des taux de drêches inférieurs à 20 %. En général, pour peu que la valeur nutritive du régime soit maintenue, des taux élevés d'incorporation de drêches de blé peuvent maintenir les performances des animaux.

Les drêches de blé ont tendance à avoir des digestibilités iléales standardisées (DIS) des acides aminés basses. Pour la plupart des acides aminés, la DIS des drêches de blé a environ 5 à 10 points de pourcentage de moins que celle du blé, ce qui est principalement dû à la plus forte teneur en fibres des drêches, par rapport aux graines de céréales. La DIS de la lysine est particulièrement faible (20 points de pourcentage de moins que le blé) et très variable, avec des valeurs allant de 9 à 83 % relevées lors de l'évaluation de 10 drêches de blé européennes (Cozannet et al., 2010a). Les conditions de séchage sont la cause probable de cette faible digestibilité : les valeurs les plus faibles ont été observées avec des produits sombres, avec l'apparition probable de réactions de Maillard,

suggérant que la couleur pourrait être une méthode rapide pour identifier les drêches à faible digestibilité des acides aminés. Ces données suggèrent également que les drêches sombres avec des valeurs de L (luminance) inférieures à 50 ont une teneur en lysine faible et variable (par rapport à la protéine brute), ainsi que des valeurs faibles et variables pour la DIS de la lysine, elles ne doivent donc pas être utilisées dans les aliments pour porcs et autres animaux monogastriques.

En raison de leur plus faible pourcentage en acide phytique, le phosphore est plus digestible dans les drêches de blé que dans le grain de blé, avec des valeurs allant de 50 à 60 % (contre 30 % dans le grain) (Nyachoti et al., 2005 ; Widyaratne et al., 2007 ; Yáñez et al., 2010).

Contrairement aux drêches de maïs, qui contribuent à la production de graisse molle, les drêches de blé incorporées dans les régimes de finition pour porcs ne modifient pas beaucoup les qualités de carcasse et celles de la graisse, même quand elles sont utilisées jusqu'à l'abattage (Stein et al., 2009). Les effets négatifs de la teneur élevée en fibres alimentaires des drêches de blé sur leur valeur énergétique et protéique pourraient être atténués par l'utilisation d'enzymes (xylanases, etc.), ce qui devrait permettre une hausse des taux d'incorporation dans les régimes pour porcs (Emiola et al., 2009). Une amélioration de l'homogénéité des drêches de blé en termes de couleur et de conditions de séchage permettra également des taux d'incorporation plus élevés.

Tableau 3 : Valeurs alimentaires des drêches de blé de distillerie destinées aux porcs

	Amidon < 7 %	Amidon > 7 %
Digestibilité de l'énergie (porc croissance) (%)	67,0	73,0
Energie digestible (porc croissance) (kcal/kg MS)	3 300	3 510
Energie métabolisable (porc croissance) (kcal/kg MS)	3 050	3 280
Energie nette (porc croissance) (kcal/kg MS)	1 920	2 130
Digestibilité fécale de l'azote (porc croissance) (%)	71,0	76,0
Digestibilité de l'énergie (porc adulte) (%)	71,0	77,0
Energie digestible (porc adulte) (kcal/kg MS)	3 500	3 680
Energie métabolisable (porc adulte) (kcal/kg MS)	3 190	3 380
Energie nette (porc adulte) (kcal/kg MS)	2 060	2 250
Digestibilité fécale de l'azote (porc adulte) (%)	75,0	79,0

L'utilisation des drêches de blé pour l'alimentation des volailles n'a commencé que lorsque ce produit est devenu disponible en grandes quantités, dans les années 1990. Pour l'alimentation des volailles, les drêches de blé de couleur claire sont préférables à celles plus sombres en raison de leur qualité supérieure (Cromwell et al., 1993 ; Cozannet et al., 2010b). Les drêches de blé ont une teneur élevée en fibres brutes et en parois cellulaires, ainsi que de faibles valeurs de digestibilité pour les volailles. Ceci entraîne une augmentation de l'excrétion d'éléments nutritifs (N et P) lorsque le taux d'incorporation des drêches augmente dans le régime (Leytem et al., 2008). Lorsque les régimes sont bien équilibrés en énergie et en acides aminés digestibles,

les drêches de blé peuvent être introduites jusqu'à 15 % dans les régimes des poulets de chair, sans nuire à la performance des animaux (Thacker et al., 2007). Certaines études ont montré que ces produits peuvent être introduits jusqu'à 5-7 % sans aucun effet négatif (Lukasiewicz et al., 2012). Toutefois, compte-tenu de la variabilité des drêches de blé, il est recommandé d'utiliser des marges de sécurité, et, par là même, des taux d'incorporation inférieurs, lorsque la composition précise et la digestibilité des drêches de blé sont inconnues. L'utilisation d'enzymes exogènes peut améliorer la valeur des drêches de blé et permettre des taux d'incorporation plus élevés dans les aliments pour volailles (Cowieson et al., 2006).

Tableau 4 : Valeurs alimentaires des drêches de blé de distillerie destinées aux volailles

	Amidon < 7 %	Amidon > 7 %
Energie métabolisable (coq) (kcal/kg MS)	2 230	2 380
Energie métabolisable (poulet) (kcal/kg MS)	2 180	2 330

- Abdelqader, M. M. ; Oba, M., 2013. Lactation performance of dairy cows fed increasing concentrations of wheat dried distillers grains with solubles. *J. Dairy Sci.*, 95 (7): 3894-3904
- Alagón Huallpa, G., 2013. Use of barley, wheat and corn distillers dried grain with solubles in diets for growing rabbits: nutritive value, growth performance and meat quality. PhD Thesis. Department of Animal Sciences. Universidad politecnica de Valencia
- ASAIM, 2006. Swine Nutrition and Management. Technical Report Series, American Soybean Association International Marketing South East Asia, Singapore
- Avelar, E. ; Jha, R. ; Beltranena, E. ; Cervantes, M. ; Morales, A. ; Zijlstra, R. T., 2010. The effect of feeding wheat distillers dried grain with solubles on growth performance and nutrient digestibility in weaned pigs. *Anim. Feed Sci. Technol.*, 160 (1): 73-77
- Azarfar, A. ; Jonker, A. ; Yu, P., 2013. Assessing protein availability of different bioethanol coproducts in dairy cattle. *Animal*, 7 (2): 255-264
- Balat, M. ; Balat, H. ; Öz, C., 2008. Progress in bioethanol processing. *Progr. Energy Combust. Sci.*, 34 (5): 551-573
- Balat, M.; Balat, H, 2009. Recent trends in global production and utilization of bio-ethanol fuel . *Appl. Energy*, 86: 2273-2282
- Bonnardeaux, J., 2007. Potential uses for distillers grains. *Dpt Agric. Food, State of Western Australia*
- Bühler, 2013. Dryers for ethanol by-products (DDGS) and biomass. *Bühler Aeroglide*
- Cabon, G. ; Meslier, E. ; Primot, Y. ; Gady, C. ; Chapoutot, P. ; Skiba, F., 2009. Diversity of energy and protein value of wheat dried distiller grains with solubles from European bioethanol plants: determination of ruminal degradability using the in situ method. *Renc. Rech. Ruminants*, 16
- Chapoutot, P. ; Dorleans, M. ; Sauvart, D., 2010. Study of degradation kinetics of cell wall components of concentrate feeds and agroindustrial by-products. *Inra Prod. Anim.*, 23 (3): 285-304
- Chapoutot, P.; Rouillé, B.; Gillet, Ph., 2011. Les drêches de blé. *CNC Idele ADEME*
- Chapoutot, P., 1998. Étude de la dégradation in situ des constituants pariétaux des aliments pour ruminants. Thèse Docteur en Sciences Agronomiques, Institut National Agronomique Paris-Grignon, Paris (FRA), 1998/11/17.
- Chaudhry, A. S. ; Webster, A. J. F., 2001. Nutrient composition and the use of solubility to estimate degradability of food proteins in cattle. *J. Sci. Food Agric.*, 81 (11): 1077-1086
- Chibisa, G. E.; Christensen, D. A.; Mutsvangwa, T. , 2012. Effects of replacing canola meal as the major protein source with wheat dried distillers grains with solubles on ruminal function, microbial protein synthesis, omasal flow, and milk production in cows. *J. Dairy Sci.*, 95 (2): 824-841
- Chibisa, G. E. ; Christensen, D. A. ; Mutsvangwa, T., 2013. Replacing canola meal as the major protein source with wheat dried distillers' grains alters omasal fatty acid flow and milk fatty acid composition in dairy cows. *Can. J. Anim. Sci.*, 93 (1): 137-147
- Cottrill, B.; Smith, C.; Berry, P.; Weightman, R.; Wiseman, J.; White, G.; Temple, M. L., 2007. Opportunities and implications of using the co-products from biofuel production as feeds for livestock. *ADAS-University of Nottingham, UK*
- Cowieson, A. J.; Hruby, M.; Pierson, E. E. M., 2006. Evolving enzyme technology: impact on commercial poultry nutrition. *Nut. Res. Rev.*, 19 (1): 90-103
- Cozannet, P. ; Primot, Y. ; Métayer, J. P. ; Gady, C. ; Lessire, M. ; Geraert, P. A. ; Le Tutour, L. ; Skiba, F. ; Noblet, J., 2009. Wheat dried distiller grains with solubles (DDGS) for pigs. *Inra Prod. Anim.*, 22 (1): 11-16
- Cozannet, P. ; Primot, Y. ; Gady, C. ; Métayer, J. P. ; Callu, P. ; Lessire, M. ; Le Tutour, L. ; Geraert, P. A. ; Skiba, F. ; Noblet, J., 2009. Nutritional values of European wheat dried distillers grains with solubles for growing pigs. *Journées Rech. Porc.*, 41: 117-130
- Cozannet, P. ; Primot, Y. ; Gady, C. ; Métayer, J. P. ; Callu, P. ; Lessire, M. ; Skiba, F. ; Noblet, J. , 2010. Ileal digestibility of amino acids in wheat distillers dried grains with solubles for pigs. *Anim. Feed Sci. Technol.*, 158 (3-4): 177-186
- Cozannet, P. ; Lessire, M. ; Métayer, J. P. ; Gady, C. ; Primot, Y. ; Geraert, P. A. ; Le Tutour, L. ; Skiba, F. ; Noblet, J., 2010. Nutritive value of wheat and maize distillers dried grains with solubles for poultry. *Inra Prod. Anim.*, 23 (5): 405-414
- Cozannet, P. ; Primot, Y. ; Gady, C. ; Métayer, J. P. ; Lessire, M. ; Skiba, F. ; Noblet J., 2010. Energy value of wheat distillers grains with solubles for growing pigs and adult sows. *J. Anim. Sci.*, 88 (7): 2382-2392
- Cozannet, P. ; Lessire, M. ; Gady, C. ; Métayer, J. P. ; Primot, Y. ; Skiba, F. ; Noblet, J., 2010. Energy value of wheat dried distillers grains with solubles in roosters, broilers, layers and turkeys. *Poult. Sci.*, 89 (10): 2230-2241
- Cozannet, P. ; Primot, Y. ; Gady, C. ; Métayer, J. P. ; Lessire, M. ; Skiba, F. ; Noblet J., 2011. Standardized amino acids digestibility of wheat distillers dried grains with solubles in force-fed roosters. *Br. Poult. Sci.*, 52 (1): 72-81
- Cozannet, P., 2010. Nutritional value of wheat distillers grains from bioethanol for monogastric animals. Thèse, *Agrocampus Ouest*, 1er juillet 2010
- Crawshaw, R., 2004. Co-product feeds: animal feeds from the food and drinks industries. *Nottingham University Press*
- Cromwell, G. L. ; Herkelman, K. L. ; Stahly, T. S., 1993. Physical, chemical, and nutritional characteristics of distillers dried grains with solubles for chicks and pigs. *J. Anim. Sci.*, 71 (3): 679-686

- Désialis, 2013. Processus Drêche de blé déshydratée. Désialis, R&D/Qualité, Châlons-en-Champagne
- Drapcho, 2008. Biofuel feedstocks, Chapter 4. In: Drapcho, C. M.; Nhuan Ph Nghim; Walker T. (Eds), Biofuels Engineering Process Technology, McGraw-Hill
- Emiola, I. A. ; Opapeju, F. O. ; Slominski, B. A. ; Nyachoti, C. M., 2009. Growth performance and nutrient digestibility in pigs fed wheat distillers dried grains with solubles-based diets supplemented with a multicarbohydrase enzyme. *J. Anim. Sci.*, 87 (7): 2315-2322
- Erchao Li; Chhorn Lim; Klesius, Ph.; Chunfang Cai, 2012. Enhancement effects of dietary wheat distiller's dried grains with solubles on growth, immunity, and resistance to Edwardsiella ictaluri challenge of channel catfish, *Ictalurus punctatus*. *J. World Aquacult. Soc.*, 43 (6): 814-827
- European Union, 2009. Directive 2009/28/EC of the European Parliament and of the Council of 23 April 2009 on the promotion of the use of energy from renewable sources and amending and subsequently repealing Directives 2001/77/EC and 2003/30/EC. Official Journal of the European Union, L 140/16: 5.6.2009
- EvaPig, 2010. EvaPig: A calculator of energy, amino acid and phosphorus values of ingredients and diets for growing and adult pigs. INRA, Ajinomoto Eurolysine SAS, AFZ
- FDA, 2010. Guidance for industry and FDA advisory levels for deoxynivalenol (DON) in finished wheat products for human consumption and grains and grain by-products used for animal feed. FDA
- Fisher, D. J. ; McKinnon, J. J. ; Mustafa, A. F. ; Christensen, D. A. ; McCartney, D., 1999. Evaluation of wheat-based thin stillage as a water source for growing and finishing beef cattle. *J. Anim. Sci.*, 77 (10): 2810-2816
- Franke, K. ; Meyer, U. ; Flachowsky, G., 2009. Distillers dried grains with solubles compared with rapeseed meal in rations of dairy cows. *J. Anim. Feed Sci.*, 18 (4): 601-612
- Gibb, D. J. ; Hao, X. ; McAllister, T. A., 2008. Effect of dried distillers' grains from wheat on diet digestibility and performance of feedlot cattle. *Can. J. Anim. Sci.*, 88 (4): 659-665
- Gohari, S.; DaneshMesgaran, M.; Vakili, A. R.; Mojtahedi, M., 2012. Effect of diet containing different amount of wheat dried distillers' grain as a substitute for alfalfa hay on Holstein lactating cow responses. *Am. J. Exp. Agric.*, 2 (3): 449-457
- Gould, D. H., 1998. Polioencephalomalacia. *J. Anim. Sci.*, 76 (1): 309-314
- Grainger, C.; Beauchemin, K. A., 2011. Can enteric methane emissions from ruminants be lowered without lowering their production?. *Anim. Feed. Sci. Technol.*, 166/167: 308-320
- Graybosch, R. A. ; Liu R. H. ; Madl, R. L. ; Shi, Yong-Cheng ; Wang, D. ; Wu, X., 2009. New uses for wheat and modified wheat products. In: Carver, B. F. (Ed.), *Wheat: Science and trade*, Volume 4 of World Agriculture Series, John Wiley & Sons
- Hazzledine, M., 2008. Nutritional and economic value of co-products from biofuel production. In: Garnsworthy, P. C.; Wiseman, J. (Eds). *Rec. Adv. in Anim. Nutr.* 2008., 1: 291-312. Nottingham University Press
- He, M. L.; Hernandez, L. M.; Aalhus, J. L.; Dugan, M. E. R.; McKinnon, J. J.; McAllister T. A., 2012. Inclusion of triticale dried distillers grain and flaxseed in feedlot cattle diets increases alpha-linoleic acid in beef without affecting carcass or meat quality traits. ADSA Meeting, Abstract W285, Phoenix, USA.
- Holtshausen, L. ; Beauchemin, K. A. ; Schwartzkopf-Genswein, K. S. ; Gonzalez, L. A. ; McAllister, T. A. ; Gibb, D. J., 2011. Performance, feeding behaviour and rumen pH profile of beef cattle fed corn silage in combination with barley grain, corn or wheat distillers' grain or wheat middlings. *Can. J. Anim. Sci.*, 91 (4): 703-710
- Iji, P. A.; Barekatin, M. R., 2011. Implications for the feed industry. In: Santos Bernardes, M. A. (Ed.). *Economic Effects of Biofuel Production*
- Ingledew, W. M., 1993. Yeast for production of fuel ethanol. In: Rose, A. H.; Harrison, J. S. (Eds.) *The Yeasts*. 2nd Ed. Vol. 5 Yeast Technology. Academic Press. New York, NY
- Kalscheur, K. F. ; Garcia, A. D. ; Schingoethe, D. J. ; Diaz Royón, F.; Hippen, A. R., 2012. Feeding biofuel co-products to dairy cattle. In: Makkar, H. (Ed.), *Biofuel co-products as livestock feed: Opportunities and challenges*, Chapter 7: 115-154
- Kerckhove, A. Y. van de ; Lardner, H. A. ; Yu, P. ; McKinnon, J. J. ; Walburger, K., 2011. Effect of dried distillers' grain, soybean meal and grain or canola meal and grain-based supplements on forage intake and digestibility. *Can. J. Anim. Sci.*, 91 (1): 123-132
- Keshun Liu, 2011. Chemical composition of distillers grains, a review. *J. Agric. Food Chem.*, 59 (5): 1508-1526
- Lewis, M., 2002. Distillery feeds and copper. *Organic farming technical summary*, Scottish Agricultural College
- Leytem, A. B. ; Kwanyuen, P. ; Thacker, P. , 2008. Nutrient excretion, phosphorus characterization, and phosphorus solubility in excreta from broiler chicks fed diets containing graded levels of wheat distillers grains with solubles. *Poult. Sci.*, 87 (12): 2505-2511
- Li Chun ; Li J. Q., Beauchemin, K. A.; Yang, W. Z., 2012. Ruminant degradability, duodenal flow and intestinal digestibility of diets varying source of protein supplements. ADSA Meeting, Abstract T307. Phoenix, USA, 361
- Li, Y. L. ; McAllister, L. T. A. ; Beauchemin, K. A. ; He, M. L. ; McKinnon, J. J. ; Yang, W. Z., 2011. Substitution of wheat dried distillers grains with solubles for barley grain or barley silage in feedlot cattle diets: Intake, digestibility, and ruminal fermentation. *J. Anim. Sci.*, 89 (8): 2491-2501
- Losand, B.; Preissinger, W.; Spiekers, H.; Urdl, M.; Gruber, L., 2009. Determination of crude nutrient digestibilities and energy content of dried distillers grains and solubles (DDGS) from wheat and wheat/barley mixtures. *Zuchtungskunde*, 173-179
- Lukasiewicz, M. ; Pietrzak, D. ; Niemiec, J. ; Mroczek, J. ; Michalczuk, M., 2012. Application of dried distillers grains with solubles (DDGS) as a replacer of soybean meal in broiler chickens feeding. *Archiv. Tierzucht*, 55 (5): 496-505
- Lyons, T. P., 2003. Production of Scotch and Irish whiskies: their history and evolution. In: Jacques, K. A.; Lyons, T. P.;

- Kelsall, D. R. (Eds) *The alcohol textbook: a reference for the beverage, fuel and industrial alcohol industries/ Nottingham University Press*
- Marouby, H.; Gaudré D., 2009. Développement des biocarburants : conséquences économiques pour la production porcine. *TechniPorc, la revue technique de l'IFIP*, 32 (2)
 - Maxin, G. ; Ouellet, D. R. ; Lapierre, H., 2013. Effect of substitution of soybean meal by canola meal or distillers' grains in dairy rations on amino acid and glucose availability. *J. Dairy Sci.*, 96 (1): 7806-7807
 - McAloon, A.; Taylor, F.; Yee, W.; Ibsen, K.; Wooley, R., 2000. Determining the cost of producing ethanol from cornstarch and lignocellulosic feedstocks. Technical Report NREL/TP- 580-28893. National Renewable Energy Laboratory, Golden, CO, USA
 - McKeown, L. E. ; Chaves, A. V. ; Oba, M. ; Dugan, M. E. R. ; Okine, E. ; McAllister, T. A., 2010. Effects of replacing barley grain with triticale-based dried distillers' grains with solubles on nutrient digestibility, lamb growth performance and carcass traits. *Can. J. Anim. Sci.*, 90 (1): 87-98
 - McKeown, L. E.; Chaves, A. V.; Oba, M.; Dugan, M. E. R.; E. Okine; McAllister, T. A., 2010. Effects of corn-, wheat- or triticale dry distillers' grains with solubles on in vitro fermentation, growth performance and carcass traits of lambs. *Can. J. Anim. Sci.*, 90 (1): 99-108
 - Molette, C. ; Nicot, M. C. ; Coulmier, D. ; Farizon, Y. ; Gidenne, T., 2009. Impact d'une incorporation élevée de drêches de distillerie de blé, dans un aliment à formulation simplifiée, sur la croissance, la qualité de la carcasse et la composition en acides gras de la viande de lapin. 13èmes Journées de la Recherche Cunicole, 17-18 novembre 2009, Le Mans, France: 14-17
 - Moreau, R. A.; Nghiem, N. P.; Rosentrater, K. A.; Johnston, D. B.; Hicks, K. B. , 2011. Ethanol production from starch-rich crops other than corn and the composition and value of the resulting DDGS. In : KeShun Liu, Rosentrater, K. A. (Ed.) *Distillers Grains: production, properties, and utilization*. 540p. CRC Press
 - Murphy, J. D.; Power, N. M., 2008. How can we improve the energy balance of ethanol production from wheat?. *Fuel*, 87 (10-11): 1799-1806
 - Mustafa, A. F. ; McKinnon, J. J. ; Ingledew, M. W. ; Christensen, D. A., 2000. The nutritive value for ruminants of thin stillage and distillers' grains derived from wheat, rye, triticale and barley. *J. Sci. Food Agric.*, 80 (5): 607-613
 - Newkirk, R., 2011. *Wheat DDGS Feed Guide: Wheat dried distiller grains with solubles. Feed Opportunities from the Biofuels Industries (FOBI), 1st Edition. Canadian International Grains Institute (Cigi)*
 - Noblet, J.; Cozannet, P.; Skiba, F., 2012. Nutritional value and utilization of wheat dried distillers grain with solubles in pigs and poultry - chapter 9. In: Makkar, H. P. S. (Ed.), *Biofuel co-products as livestock feed: Opportunities and challenges*. FAO, Rome
 - Nuez-Ortin, W. G.; Yu, P., 2010. Effects of bioethanol plant and coproduct type on the metabolic characteristics of the proteins in dairy cattle. *J. Dairy Sci.*, 93: 3775-3783
 - Nyachoti, C. M. ; House, J. D. ; Slominski, B. A. ; Seddon, I. R., 2005. Energy and nutrient digestibilities in wheat dried distillers' grains with solubles fed to growing pigs. *J. Sci. Food Agric.*, 85 (15): 2581-2586
 - O'Brien, D.; Woolverton, M., 2009. Recent trends in U.S. wet and dry corn milling production. *AgMRC, Renewable energy newsletter*
 - O'Hara, A. S.; Tanner, A.; McAllister, T. A.; Gibb, D. J.; van Herk, F.; Chaves, A. V., 2011. Effect of low and high oil corn distillers' grain on rumen fermentation, growth performance and carcass characteristics of lambs. *Anim. Prod. Sci.*, 51 (8): 708-716
 - OECD-FAO, 2013. *Database - OECD-FAO Agricultural Outlook*. OECD
 - Penner, G. B.; Yu, P.; Christensen, D. A., 2009. Effect of replacing forage or concentrate with wet or dry distillers' grains on the productivity and chewing activity of dairy cattle. *Anim. Feed Sci. Technol.*, 153 (1/2): 1-10
 - Piron, F. ; Bruyer, D. ; Théwis, A. ; Beckers Y., 2009. European bioethanol by-products from cereal grains have a variable composition. Huitièmes Journées de la Recherche Avicole, St Malo, 25 et 26 mars 2009
 - Randall, K. M. ; Drew, M. D., 2010. Fractionation of wheat distiller's dried grains and solubles using sieving increases digestible nutrient content in rainbow trout. *Anim. Feed Sci. Technol.*, 159 (3-4): 138-142
 - Reveco, F. E. ; Collins, S. A. ; Randall, K. M. ; Drew, M. D., 2012. Aqueous fractionation improves the nutritional value of wheat distillers grains for rainbow trout (*Oncorhynchus mykiss*). *Aquacult. Nutr.*, 18 (2): 202-210
 - Renewable Fuels Association, 2013. *E15: the new fuel*. Renewable Fuels Association, Washington DC, USA
 - Rosentrater, K. A., 2007. Ethanol processing co-products: economics, impacts, sustainability. In: Eaglesham, A.; Hardy, R. W. F. (Eds). *Agricultural biofuels: technology, sustainability and profitability*. Proc. 19th Conf. Nat. Agric. Biotech. Council, Brookings, South Dakota, USA, 22-24 May, 2007, Conf. paper NABC Report, 19: 105-126
 - Sauvant, D.; Perez, J. M.; Tran, G., 2004. *Tables INRA-AFZ de composition et de valeur nutritive des matières premières destinées aux animaux d'élevage: 2ème édition*. ISBN 2738011586, 306 p. INRA Editions Versailles
 - Schoenau, J., 2011. Co-products of the bioenergy industry: value as soil amendments. In: *Farming for Profit 2011, 18TH annual Moose Jaw Conference, June 26-27, 2011 - Competition from Ukraine and Russia: Making agriculture more productive and profitable*
 - Stein, H. H. ; Shurson, G. C., 2009. The use and application of distillers dried grains with solubles in swine diets. *J. Anim. Sci.*, 87 (4): 1292-1303
 - Thacker, P. A. ; Widyaratne, G. P., 2007. Nutritional value of diets containing graded levels of wheat distillers grains with solubles fed to broiler chicks. *J. Sci. Food Agric.*, 87 (7): 1386-1390
 - Thacker, P. A., 2006. Nutrient digestibility, performance and carcass traits of growing-finishing pigs fed diets containing dried wheat distillers grains with solubles. *Can.*

J. Anim. Sci. 86 (4): 527–529

- Tibelius, C.; Trenholm, 1996. Coproducts and near coproducts of fuel ethanol fermentation from grain. Agriculture and Agri-Food Canada
- US EPA, 2010. Renewable fuel standard program (RFS2) regulatory impact analysis. US Environmental Protection Agency
- Vanness, S. J.; Klopfenstein, T. J.; Erickson, G.E.; Karges, K. K., 2009. Sulfur in distillers grains. Nebraska Beef Report, 79–80
- Walter, L. J.; Aalhus, J. L.; Robertson, W. M.; McAllister, T. A.; Gibb, D. J.; Dugan, M. E. R.; Aldai, N.; McKinnon, J. J., 2010. Evaluation of wheat or corn dried distillers' grains with solubles on performance and carcass characteristics of feedlot steers. Can. J. Anim. Sci., 90 (2): 259-269
- Walter, L. J.; McAllister, T. A.; Yang, W. Z.; Beauchemin, K. A.; He, M.; McKinnon, J. J., 2012, 2012. Comparison of wheat or corn dried distillers grains with solubles on rumen fermentation and nutrient digestibility by feedlot heifers. J. Anim. Sci., 90, 1291-1300
- Weiss, B.; Eastridge, M.; Shoemaker, D.; St-Pierre, N., 2007. Distillers Grains. Ohio State University, Ohio State University Extension Factsheet
- Widyaratne, G. P. ; Zijlstra, R. T., 2007. Nutritional value of wheat and corn distiller's dried grain with solubles: Digestibility and digestible contents of energy, amino acids and phosphorus, nutrient excretion and growth performance of grower-finisher pigs. Can. J. Anim. Sci., 87 (1): 103–114
- Widyaratne, G. P. ; Patience, J. F. ; Zijlstra, R. T., 2009. Effect of xylanase supplementation of diets containing wheat distillers dried grains with solubles on energy, amino acid and phosphorus digestibility and growth performance of grower-finisher pigs. Can. J. Anim. Sci., 89 (1): 91-95
- Yáñez, J. L. ; Beltranena, E. ; Cervantes, M. ; Zijlstra, R. T., 2010. Effect of phytase and xylanase supplementation or particle size on nutrient digestibility of diets containing distillers dried grains with solubles cofermented from wheat and corn in ileal-cannulated grower pigs. J. Anim. Sci., 89 (1): 113–123
- Yue Qun ; Yang HongJian ; Xie ChunYuan ; Yao XueBo ; Wang JiaQi, 2007. Estimation of protein intestinal digestibility of ruminant feedstuffs with mobile nylon bag technique and three-step in vitro procedure. J. China Agric. Univ., 12: 62-66
- Zhang, S. Z. ; Penner, G. B. ; Abdelqader, M. ; Oba, M., 2010. Effects of feeding alfalfa hay on chewing, rumen pH, and milk fat concentration of dairy cows fed wheat dried distillers grains with solubles as a partial substitute for barley silage. J. Dairy Sci., 93 (7): 3243-3252

Rédaction : Valérie Heuzé et Gilles Tran (AFZ : Association Française de Zootechnie) - Benoît Rouillé (Institut de l'Élevage)
Conception : Marie-Catherine Leclerc (Institut de l'Élevage) - **Mise en page :** Corinne Maigret (Institut de l'Élevage)
Sources : AFZ et Feedipedia (www.feedipedia.org) - **Réf IE :** 0023 302 020 - Avril 2023