ACADÉMIE d'AGRICULTURE de FRANCE

**Encyclopédie : *Question sur***

*Les erreurs passent, il n'y a que le vrai qui reste* (Diderot)

# Les composés dicarbonylés dans les aliments et le corps humain

**Fiche *QUESTIONS SUR…* n° 08.04.Q16** | **février 2025**

**Mots clés : composés dicarbonylés, méthylglyoxal, 3-désoxyglucosone, glycation**

**Les composés dicarbonylés sont présents dans des aliments aussi variés que le vin, le miel ou le pain, mais aussi dans nos cellules et notre sang. Ils sont généralement chimiquement très réactifs, et donc impliqués dans de nombreuses réactions. Ils ne sont pas toujours simples à quantifier, mais un intérêt croissant est porté à leurs devenir métabolique et à leurs effets sur la santé.**

**Certains scientifiques, qui observent leur abondance dans plusieurs pathologies, n'hésitent pas à parler de *stress dicarbonylé* !**[1]

## Quelle est la définition d'un composé dicarbonylé ?

Les molécules des composés dicarbonylés portent deux de ces fonctions carbonyles[2] : aldéhyde (-CHO), cétone (-C=O), acide (-COOH) ou ester (-COOR). Ces molécules peuvent être fonctionnellement symétriques et posséder deux groupes aldéhydiques (*i.e.* dialdéhydes) ou deux groupes cétones (*i.e.* dicétones). D'autres peuvent être asymétriques avec la combinaison d'un groupe cétone et d'un groupe acide (*i.e.* dicarbonyles céto-acides).

Les deux fonctions carbonyles-CO sont généralement proches l'une de l'autre, et les chimistes organiciens précisent généralement cette proximité en parlant de 1,2-, 1,3- 1,4- ou 1,5-dicarbonyles.

## Quelques exemples de composés dicarbonylés bien connus

Les composés dicarbonylés sont souvent connus sous d'autres noms que ceux de la nomenclature chimique officielle. Par exemple, les biochimistes connaissent l'acide 2-oxopropanoïque sous le nom d'acide pyruvique (ou le nom de sa base conjuguée : le pyruvate), qui est un intermédiaire majeur des voies métaboliques cellulaires (*Figure 1-a*). Ce composé est donc un 1,2-dicarbonyle asymétrique céto-acide.

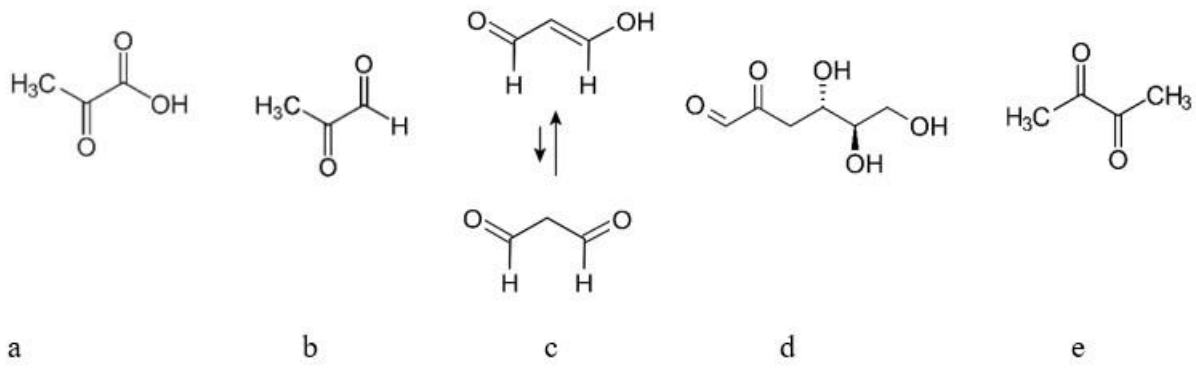


*Figure 1 :* Molécules de quelques composés dicarbonylés
a : acide pyruvique b : méthylglyoxal c : malondialdéhyde d : 3-désoxyglucosone e : diacétyle.

Un autre 1,2-dicarbonyle asymétrique très étudié est le méthylglyoxal (*Figure 1-b*) aussi appelé 2-oxoaldéhyde[3] ; c'est un céto-aldéhyde dérivé de l'acide pyruvique, largement décrit pour sa réactivité chimique

[1] Rabbani et al., 2021.

[2] Une fonction carbonyle est constituée d'un atome de carbone lié par une double liaison à un atome d'oxygène.

[3] Préfixe oxo : présence d'un atome d'oxygène doublement lié à un autre atome ; les cétones, par exemple sont des composés oxo.


Reproduction autorisée sous réserve d'en citer la provenance

dans la glycation des protéines (post-réaction d'une protéine avec un sucre dit réducteur, tel le D-glucose), pour ses propriétés potentiellement toxiques et pour ses voies de détoxification chez l'Homme.

Pour les experts des corps gras, c'est peut-être le malondialdéhyde qui est le plus connu des composés dicarbonylés (*Figure 1-c*). En effet, ce composé, aussi appelé propanedial, est un produit de peroxydation des acides gras insaturés. Il est souvent utilisé comme marqueur biochimique du stress oxydant[4].

Plusieurs dérivés dicarbonylés des hexoses (les sucres à six atomes de carbone, tels que le D-glucose, le D-fructose ou le D-galactose) ont également été décrits et sont retrouvés aussi bien dans l'alimentation qu'*in vivo*. L'un des plus étudiés, et sans doute des plus abondants, est le 3-désoxyglucosone (*Figure 1-d*). Ce composé semble très impliqué dans les réactions de glycation des protéines : c'est un produit de dégradation de la glycation précoce, et également un produit réactif de la glycation avancée (deux étapes séquentielles de la réaction de glycation). Plusieurs autres intermédiaires alpha-oxoaldéhydes de la glycation ont été décrits[5]. Parmi ceux-ci on peut trouver le glucosone, le 1-désoxyglucosone, le 3,4-didésoxyglucosone, le ribosone, le 3-désoxyribosone, l'érythrosone et le 3-désoxyérythrosone.

Enfin, depuis 2024, un autre composé dicarbonylé a fait la une des médias : l'acide glyoxylique (*Figure 2-a*) ; en effet, l'Anses – associée à d'autres organismes publics – a informé[6] les professionnels des salons de coiffure et les utilisateurs d'une possible toxicité rénale de ce composé utilisé comme produit lissant des cheveux.

Un autre composé, la dihydroxyacétone, est aussi utilisé comme ingrédient actif dans l'industrie cosmétique, pour sa très forte réactivité avec les protéines et la formation d'une coloration brune sur les kératines de la peau (bronzage artificiel par glycation) (*Figure 2-b*). Bien que ce composé ne porte qu'une fonction carbonyle, sa molécule constituée de trois atomes de carbone (triose) – dont un groupe cétone – explique sa forte réactivité et son utilisation comme principe actif autobronzant.

*Figure 2 :* Molécules de deux ingrédients actifs utilisés par l'industrie cosmétique :
a : acide glyoxylique b : dihydroxyacétone.

## Quelle est l'origine des composés dicarbonylés dans les aliments ?

La plupart des composés dicarbonylés sont formés à la suite de la dégradation des glucides résultant du traitement thermique des aliments. Après hydrolyse des oligo- et poly-saccharides, les mono- ou di-saccharides libérés subissent des dégradations telles que des déshydratations et des oxydations ; ces réactions chimiques plus ou moins réversibles conduisent à la formation de composés dicarbonylés, parmi lesquels le 3-désoxyglucosone est souvent majoritaire.

Une autre voie de synthèse des composés dicarbonylés est la fermentation. En effet, plusieurs micro-organismes – utilisés entre autres dans les filières du lait et de la bière – ont la capacité enzymatique de produire des composés dicarbonylés, tels que le méthylglyoxal (*Figure 1-b*) ou le diacétyle (*Figure 1-e*, note caractéristique de beurre)[7].

## Les composés dicarbonylés sont-ils stables dans les aliments ?

Lors de traitements thermiques prolongés, la forte réactivité des dicarbonyles entraîne la formation de composés odorants et de couleurs caractéristiques des réactions de caramélisation.

De nombreux hétérocycles (avec des atomes d'oxygène ou d'azote, en plus des atomes de carbone qui forment des structures cycliques) néoformés dans les aliments sont issus de la

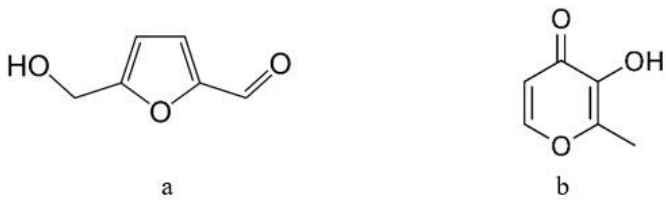


*Figure 3 :* a : hydoxyméthylfurfural b : maltol (additif E636)

[4] Eggen et al., 2022.

[5] D'Aronco et al., 2019.

[6] https://anses.fr/fr/content/actu-lissage*e*

[7] Murata et al., 1985.


Reproduction autorisée sous réserve d'en citer la provenance

dégradation des composés dicarbonylés, eux-mêmes issus de la dégradation des glucides.. Parmi les plus connus, on peut citer l'hydroxyméthylfurfural et le maltol, aussi utilisé comme additif, de code européen E636 (*Figure 3* en page 2).

Les composés dicarbonylés sont aussi dégradés par réaction chimique en présence d'autres composés de leur environnement. C'est notamment le cas des matrices alimentaires qui contiennent des protéines, des peptides et des acides aminés libres. Dans cette condition, les fonctions amine (-NH2) et guanidine (avec trois atomes d'azote enchaînés dans le squelette carboné de la molécule) des lysine et arginine, respectivement, réagissent avec les fonctions dicarbonylées pour former des composés appelés AGE (*Advanced Glycation Endproducts*). On parle d'addition nucléophile d'une fonction amine sur une fonction carbonyle. Par exemple, le produit de condensation de la lysine et du 3-désoxyglucosone est la pyrraline, et celui de la lysine et du méthylglyoxal est la *N-e*-carboxyéthyl-lysine.

Contrairement aux composés dicarbonylés, les AGE sont considérés comme stables au cours de la transformation et du stockage des aliments.

## Dans quels aliments trouve-t-on des composés dicarbonylés ?

Le dosage des composés dicarbonylés dans les aliments est relativement récent. L'extraction, la détection et la quantification de ces composés aux molécules instables sont particulièrement délicates. C'est généralement après dérivatisation en quinoxalines stables, en présence d'ortho-phénylènediamine, que les composés dicarbonylés sont quantifiés par chromatographie liquide couplée à un détecteur UV ou à un spectromètre de masse.

La plupart des publications sur le sujet porte sur une famille particulière d'aliments, tels que le café, la bière, le miel, le pain ou le chocolat. Seules quelques études ont quantifié les composés dicarbonylés (essentiellement 3-désoxyglucosone, méthylglyoxal et glyoxal) dans une large gamme d'aliments de consommation courante, afin de proposer une base de données utilisable par les épidémiologistes, toxicologues et autres scientifiques intéressés par l'étude de l'exposition alimentaire aux composés dicarbonylés.

Selon une étude allemande[8], le 3-désoxyglucosone serait le composé dicarbonylé majeur de notre alimentation, avec une concentration qui atteint 2 622 mg/litre dans le vinaigre balsamique, 410 mg/litre dans les jus de fruits, et 385 mg/kilogramme dans les biscuits.

Une étude hollandaise plus récente[9] – réalisée sur 223 aliments et boissons – corrobore l'abondance relative du 3-désoxyglucosone face au méthylglyoxal et glyoxal, et confirme la forte teneur en composés dicarbonylés dans les boissons riches en sucres simples.

La comparaison de ces deux études montre cependant que les estimations d'expositions journalières aux composés dicarbonylés ne sont pas concordantes : l'étude allemande trouve une exposition alimentaire au 3-désoxyglucosone et au méthylglyoxal de 20 à 160 et 5 à 20 mg/jour, respectivement, contre seulement 9 et 3 mg/jour, respectivement, pour l'étude hollandaise. La différence d'habitudes alimentaires entre les deux populations ne peut expliquer à elle seule la forte disparité observée, de sorte que des biais analytiques non identifiés sont sans doute à l'origine des fortes différences de concentrations mesurées entre les deux études.

## Les composés dicarbonylés sont-ils aussi formés *in vivo* chez l'Homme ?

Le 3-désoxyglucosone, le méthylglyoxal et le glyoxal sont trois composés dicarbonylés retrouvés dans la circulation sanguine et dans différents tissus de l'organisme humain[10]. Leur origine, leur métabolisme et leurs effets sur la santé ont été essentiellement étudiés par les experts de la glycation, qui ont rapidement constaté que ces composés étaient hautement plus réactifs que le glucose. C'est ainsi qu'il a été découvert qu'en conditions physiologiques (37 °C, pH 7,4, milieu aqueux), différents AGE étaient formés par réaction de glycation entre la lysine ou l'arginine et les composés dicarbonylés. Parmi les AGE les plus abondants *in vivo*, on peut citer le MG-H1 (methylglyoxal-derived hydroimidazolone) et la CEL (*N*-$\varepsilon$-carboxyéthyl-lysine) dérivés du méthylglyoxal, et la CML (*N*-$\varepsilon$-carboxyméthyl-lysine) dérivée du glyoxal.

---

8 Degen et al., 2012.

9 Maasen et al., 2021.

10 Brings et al., 2017.


Reproduction autorisée sous réserve d'en citer la provenance

Le composé dicarbonylé le plus étudié *in vivo* est probablement le méthylglyoxal. Il est principalement formé de manière endogène par dégradation spontanée des triose-phosphates (composés intermédiaires de la glycolyse). Il est estimé que 0,05 à 0,1 % des triose-phosphates seraient dégradés en méthylglyoxal[11]. Il est aussi calculé qu'environ 200 mg de méthylglyoxal seraient produits dans nos tissus chaque jour. Enfin la concentration plasmatique de méthylglyoxal augmente avec l'âge et accompagne un certain nombre de pathologies comme l'obésité, le diabète et l'insuffisance rénale.

La formation endogène du glyoxal a été décrite comme étant issue de la dégradation oxydative du glucose, de la fructose-lysine (produit de glycation) et des acides gras poly-insaturés.

Enfin le 3-désoxyglucosone endogène serait issu de la déglycation de la fructose-lysine et autres fructose-amine *via* l'enzyme fructoseamine-3-kinase.

Même s'il a été établi que les composés dicarbonylés peuvent être formés *in vivo*, d'autres études, de plus en plus nombreuses, tentent de comprendre quel est le devenir métabolique des composés dicarbonylés exogènes (apportés par les aliments), d'estimer la contribution relative des deux sources d'exposition, et de découvrir leurs effets sur la santé.

Frédéric J. TESSIER, membre de l'Académie d'Agriculture de France

**Ce qu'il faut retenir :**

Ubiquitaires, les composés dicarbonylés intéressent aussi bien les biologistes que les chimistes : ce sont les réactifs et les produits de nombreuses réactions chimiques ou enzymatiques dans les aliments et le corps humain. Ils sont impliqués dans la formation de nombreux composés dits néoformés dans les aliments, tels que des composés odorants ou colorés. Dans le corps humain, leur concentration élevée observée dans certaines pathologies (telles que le diabète) suggère l'existence d'une relation causale.

Certains composés dicarbonylés, utilisés comme principes actifs en cosmétique, sont signalés par l'Anses comme présentant un risque de toxicité rénale.

**Pour en savoir plus :**


- S. BRINGS, T. FLEMING, M. FREICHEL M.U. MUCKENTHALER, S. HERZIG & P.P. NAWROTH : *Dicarbonyls and advanced glycation end-products in the development of diabetic complications and targets for intervention*, Int J Mol Sci. 2017 May 5;18(5):984. doi: 10.3390/ijms18050984 .
- S. D'ARONCO, S. CROTTI, M. AGOSTINI, P. TRALDI , N.C. CHILELLI & A. LAPOLLA : *The role of mass spectrometry in studies of glycation processes and diabetes management,* Mass Spectrom Rev. 2019 Jan;38(1):112-146. doi: 10.1002/mas.21576.
- J. DEGEN, M. HELLWIG, T. HENLE : *1,2-dicarbonyl compounds in commonly consumed foods*, J Agric Food Chem. 2012 Jul 18;60(28):7071-9. doi: 10.1021/jf301306g.
- M.D. EGGEN, P. MERBOTH, H. NEUKIRCHNER, M.A. GLOMB : Lipid peroxidation has major impact on malondialdehyde-derived but only minor influence on glyoxal and methylglyoxal-derived protein modifications in carbohydrate-rich foods, J Agric Food Chem. 2022 Aug 24;70(33):10271-10283. doi: 10.1021/acs.jafc.2c04052.
- K. MAASEN, JLJM. SCHEIJEN, A. OPPERHUIZEN, CDA. STEHOUWER, MM. VAN GREEVENBROEK & CG. SCHALKWIJK : *Quantification of dicarbonyl compounds in commonly consumed foods and drinks; presentation of a food composition database for dicarbonyls*, Food Chem. 2021 Mar 1;339:128063. doi: 10.1016/j.foodchem.2020.128063.
- K. MURATA, Y. FUKUDA , K. WATANABE, T. SAIKUSA, M. SHIMOSAKA & A. KIMURA : *Characterization of methylglyoxal synthase in saccharomyces cerevisiae*, Biochem Biophys Res Commun. 1985 Aug 30;131(1):190-8. doi: 10.1016/0006-291x(85)91788-7.
- N. RABBANI, M. XUE, PJ. THORNALLEY, : *Methylglyoxal-induced dicarbonyl stress in aging and disease: first steps towards glyoxalase 1-based treatments*, Clin Sci. 2016 Oct 1;130(19):1677-96. doi: 10.1042/CS20160025.
- N. RABBANI, M. XUE & PJ. THORNALLEY : *Dicarbonyl stress, protein glycation and the unfolded protein response*, Glycoconj J. 2021 Jun;38(3):331-340. doi: 10.1007/s10719-021-09980-0.


[11] Rabbani et al., 2016.


Reproduction autorisée sous réserve d'en citer la provenance