

[AVIS 09-2023](#)

Objet:

**Évaluation d'une demande de dérogation  
pour la friture de produits à base de viande  
dans une huile dont la température est  
supérieure à 180 °C**

(SciCom 2023/01)

Avis scientifique approuvé par le Comité scientifique le 23 juin 2023

**Mots clés:**

huile de tournesol, friture, température, produits à base de viande, boulettes de viande, hydrocarbures aromatiques polycycliques, amines aromatiques hétérocycliques, *N*-nitrosamines, oxydation, stabilité à l'oxydation

**Key terms:**

sunflower oil, deep-frying, temperature, meat products, meatballs, polycyclic aromatic hydrocarbons, heterocyclic aromatic amines, *N*-nitrosamines, oxidation, oxidative stability

## Table des matières

Résumé .....	3
Summary .....	4
1. Termes de référence .....	7
1.1. Questions .....	7
1.2. Méthode.....	7
2. Définitions & Abréviations .....	7
3. Contexte .....	9
4. Introduction: analyse des risques.....	10
5. Avis.....	11
5.1. <i>Évaluation des documents reçus dans le cadre de la demande de dérogation</i> .....	11
5.1.1. Type et composition de l'huile de friture utilisée .....	11
5.1.2. Type de produits à base de viande et préparation à la friture.....	11
5.1.3. Mesures correctives de l'opérateur et évaluation des enregistrements de température de l'huile de friture.....	11
5.1.4. Évaluation des résultats d'analyse pour l'huile de friture et les produits à base de viande .....	12
5.1.5. Conclusion.....	14
5.2. <i>Analyse de la littérature</i> .....	17
5.2.1. Oxydation de l'huile de tournesol .....	17
5.2.2. Formation d'hydrocarbures aromatiques polycycliques dans l'huile de tournesol .....	17
5.2.3. Formation d'hydrocarbures aromatiques polycycliques dans les produits frits à base de viande .....	20
5.2.4. Formation de N-nitrosamines dans les produits frits à base de viande.....	20
5.2.5. Formation d'amines aromatiques hétérocycliques dans les produits frits à base de viande .....	22
5.2.6. Stabilité oxydative au cours du stockage des produits frits à base de viande .....	23
5.2.7. Évaluation de l'examen de la littérature : implications pour le processus de friture de l'opérateur ..	23
5.3. <i>Simulation de la formation d'amines aromatiques hétérocycliques lors de la friture d'une boulette de viande de 9 g dans de l'huile de tournesol pendant deux minutes à des températures de 182 °C et 187 °C</i> .....	26
6. Incertitudes .....	28
7. Conclusions.....	29
8. Recommandations.....	30
Références .....	31
Membres du Comité scientifique.....	35
Conflit d'intérêts .....	35
Remerciement.....	35
Composition du groupe de travail .....	36
Cadre juridique.....	36
Disclaimer.....	36
Annexe 1 .....	37

## Résumé

### Évaluation d'une demande de dérogation pour la friture de produits à base de viande dans une huile dont la température est supérieure à 180 °C

#### Contexte et Termes de référence

Un opérateur de la chaîne alimentaire a introduit une demande de dérogation auprès de l'AFSCA pour la friture de produits à base de viande dans de l'huile dont la température est supérieure à 180 °C. La température maximale légale est 180 °C et une tolérance de 2 °C est accordée par l'AFSCA. Au cours du processus de friture de produits à base de viande dans de l'huile de tournesol, l'opérateur autorise des dépassements ponctuels de 182 °C. Ces dépassements sont toutefois contrôlés et associés à des mesures correctives.

Conformément à la législation et à la circulaire PCCB/S3/VVN/1148069, l'AFSCA peut, sur demande motivée d'un fabricant ou d'un préparateur et sur avis du Comité scientifique, accorder une dérogation pour le procédé de friture appliqué par le fabricant ou le préparateur. Pour cette raison, il est demandé au Comité scientifique de répondre à la question suivante : « Existe-t-il un risque lié à l'utilisation d'huile à une température supérieure à 180 °C pour la friture de produits à base de viande ? »

#### Méthode

L'avis se base sur l'examen de la littérature et l'opinion d'experts, sur les documents de l'opérateur et sur une estimation de la formation de contaminants de procédé (amines aromatiques hétérocycliques) dans les boulettes de viande réalisée en appliquant un modèle de cinétique issu de la littérature.

#### Conclusions

Le Comité scientifique n'a pas d'objection à ce que l'AFSCA réponde favorablement à la demande de dérogation de l'opérateur pour la friture de boulettes de viande dans de l'huile de tournesol à une température supérieure à 180 °C mais limitée à 186 °C. Des mesures correctives doivent toutefois être appliquées à partir du dépassement de 183 °C (température d'action choisie par l'opérateur). Les mesures correctives consistent en la destruction des boulettes frites de viande et au changement immédiat de l'huile de friture. Cela est nécessaire si (i) la température de l'huile dépasse 183 °C pendant six minutes et que ce dépassement s'accompagne d'une teneur en matières polaires dépassant 25% (norme légale conformément à l'arrêté royal du 22 janvier 1988) ou si (ii) la température de l'huile dépasse 186 °C. Il convient de noter que la tolérance de température de l'huile autorisée par l'AFSCA est de 182 °C. Cependant, le processus de friture de l'opérateur (friteuse électrique et processus par lots) est intrinsèquement sensible aux fluctuations de température. Grâce aux données d'enregistrement de la température sur une période plus longue (avec seulement quelques dépassements de 182 °C), le Comité scientifique peut affirmer qu'il est acceptable que les mesures correctives décrites ci-dessus ne soient prises qu'à partir d'une température de 183 °C.

L'avis du Comité scientifique est notamment motivé par le fait que les données analytiques de l'huile de friture (des acides gras libres, des triglycérides dimériques et polymériques, des substances polaires sur la graisse et l'indice de peroxyde) sont conformes aux normes légales. Cela montre que l'opérateur contrôle son processus.

En outre, sur la base des opinions d'experts et de l'étude de la littérature, six risques ont été pris en compte :

- 1) oxydation de l'huile de tournesol ;
- 2) formation d'hydrocarbures aromatiques polycycliques dans l'huile de tournesol ;
- 3) formation d'hydrocarbures aromatiques polycycliques dans les produits frites à base de viande ;
- 4) stabilité oxydative pendant la conservation des produits frites à base de viande ;
- 5) formation de *N*-nitrosamines dans les produits frites à base de viande ; et

6) formation d'amines aromatiques hétérocycliques dans les produits frits à base de viande.

Le Comité scientifique estime que la formation d'amines aromatiques hétérocycliques dans les produits frits à base de viande est le seul risque pertinent. Une simulation de la formation d'amines aromatiques hétérocycliques a donc été réalisée pour le produit le plus critique de l'opérateur, une boulette de viande d'un diamètre de 2,5 cm. Sur la base de paramètres cinétiques provenant de la littérature, la formation d'amines aromatiques hétérocycliques dans la boulette de viande a été simulée pour l'application d'un procédé de friture de deux minutes à 182 °C (tolérance maximale de l'AFSCA) d'une part et à 187 °C (1 °C de plus que la température à laquelle l'opérateur détruit immédiatement les boulettes de viande) d'autre part. La simulation permet de conclure que l'augmentation de la formation d'amines aromatiques hétérocycliques à 187 °C par rapport à 182 °C est très limitée. Sur la base de cette simulation, le Comité scientifique est d'avis qu'il n'y a pas de risque associé à la consommation des boulettes frites de viande fabriquées par cet opérateur lorsque des dépassements ponctuels de la température maximale de l'huile de 180 °C se produisent au cours du processus de friture, à condition que les mesures correctives de l'opérateur soient appliquées de manière cohérente.

### Recommandations

Le Comité scientifique recommande de calibrer régulièrement le thermostat de la friteuse électrique.

Plutôt que de déterminer les acides gras libres, le Comité scientifique recommande de mesurer la fraction polaire comme contrôle de routine sur l'huile de tournesol. En effet, la fraction polaire prend en compte plus de produits de dégradation que les seuls acides gras libres et constitue donc une méthode plus précise pour déterminer l'état de dégradation de l'huile de friture.

En outre, le Comité scientifique recommande d'utiliser une huile ayant une teneur plus faible en acides gras polyinsaturés et une teneur plus élevée en acides gras monoinsaturés que l'huile de tournesol utilisée actuellement par l'opérateur, car la première présentera une meilleure stabilité à l'oxydation.

---

## Summary

### Evaluation of a request for derogation for deep-frying meat products in oil with a temperature higher than 180 °C

#### Background & Terms of reference

A food chain operator submitted an application to the FASFC for a derogation for deep-frying meat products in oil with a temperature higher than 180 °C. The legal maximum temperature is 180 °C and a tolerance of 2 °C is permitted by the FASFC. During the deep-frying process of meat products in sunflower oil, the operator allows accidental exceedances of 182 °C. However, these exceedances are monitored and associated with corrective measures.

In accordance with the legislation and circular PCCB/S3/VVN/1148069, the FASFC may grant a derogation for the deep-frying process applied by the manufacturer or processor at the justified request of a manufacturer or processor and on the advice of the Scientific Committee. For this reason, the Scientific Committee is asked to provide an answer to the following question: "Is there a risk associated with the use of oil with a temperature higher than 180 °C for deep-frying meat products?"

## Method

The opinion is based on literature review and expert opinion, documents from the operator and an estimation of the formation of process contaminants (heterocyclic aromatic amines) in meatballs by applying a kinetic model from the literature.

## Conclusions

The Scientific Committee has no objections if the FASFC responds favourably to the operator's request for a derogation for deep-frying meatballs in sunflower oil with a temperature higher than 180 °C but limited to 186 °C. However, corrective measures must be applied from the excess of 183 °C (action temperature chosen by the operator) onwards. The corrective measures involve destroying the deep-fried meatballs and changing the frying oil immediately. This must be done if (i) the oil temperature exceeds 183 °C during six minutes and this is accompanied by a content of polar compounds higher than 25% (legal norm according to royal decree of 22 January 1988) or if (ii) the oil temperature exceeds 186 °C. It should be noted that the oil temperature tolerance allowed by the FASFC is 182°C. However, the operator's deep-frying process (electric fryer and batch process) is inherently sensitive to temperature fluctuations. Because of temperature recording data over a longer period (with only a few exceedances of 182 °C), the Scientific Committee can state that it is acceptable that the corrective measures described above are only taken from a temperature of 183 °C onwards.

One reason for the Scientific Committee's opinion is that the analytical data of the frying oil (free fatty acids, dimeric and polymeric triglycerides, polar substances on the fat and peroxide number) meet the legal standards. This shows that the operator is in control of his process.

In addition, based on expert opinion and literature review, six hazards were considered:

- 1) oxidation of sunflower oil;
- 2) formation of polycyclic aromatic hydrocarbons in sunflower oil;
- 3) formation of polycyclic aromatic hydrocarbons in deep-fried meat products;
- 4) oxidative stability during preservation of deep-fried meat products;
- 5) formation of N-nitrosamines in deep-fried meat products; and
- 6) formation of heterocyclic aromatic amines in deep-fried meat products.

The Scientific Committee considers that the formation of heterocyclic aromatic amines in deep-fried meat products is the only pertinent risk. A simulation of the formation of heterocyclic aromatic amines was therefore performed for the operator's most critical product, a meatball with a diameter of 2.5 cm. Based on kinetic parameters from the literature, the formation of heterocyclic aromatic amines in the meatball was simulated for the application of a deep-frying process for two minutes at 182 °C (FASFC maximum tolerance) on the one hand and 187 °C (1 °C higher than the temperature at which the operator immediately destroys the meatballs) on the other hand. It can be concluded from the simulation that the increase in the formation of heterocyclic aromatic amines at 187 °C compared to 182 °C is very limited. On the basis of this simulation, the Scientific Committee is of the opinion that there is no risk associated with the consumption of the deep-fried meatballs produced by this operator when accidental exceedances of the maximum oil temperature of 180 °C occur during the deep-frying process, with the proviso that the operator's corrective measures are consistently applied.

## Recommendations

The Scientific Committee recommends regularly calibrating the thermostat of the electric fryer.

The Scientific Committee recommends that rather than the determination of free fatty acids, the polar fraction should be measured as a routine check of sunflower oil. This is because the polar fraction takes into account more degradation products than just free fatty acids and is therefore a more accurate method for determining the degradation status of frying oil.

In addition, the Scientific Committee recommends using an oil with a lower content of polyunsaturated fatty acids and a higher content of monounsaturated fatty acids instead of the sunflower oil currently used by the operator, as the former offers better oxidative stability.

## 1. Termes de référence

### 1.1. Questions

Un opérateur de la chaîne alimentaire a introduit auprès de l'AFSCA une demande de dérogation pour la friture de produits à base de viande dans de l'huile à une température supérieure à 180 °C. Le Comité scientifique est donc invité à évaluer le risque lié à la friture de produits à base de viande dans de l'huile dont la température est supérieure à la température indiquée.

Il est à noter qu'une tolérance de 2 °C est admise par l'AFSCA. Il ressort toutefois des documents fournis par l'opérateur que les dépassements de la température de l'huile supérieurs à 182 °C sont plutôt de nature ponctuelle. Dans le cadre de cet avis, le Comité scientifique interprète donc la question telle qu'elle a été reçue par l'administration de l'AFSCA de la manière suivante : « Existe-t-il un risque lié à la consommation de produits frits à base de viande dans de l'huile de tournesol lorsque des dépassements ponctuels de la température maximale de 180 °C se produisent ? »

### Dispositions légales

**L'arrêté royal du 22 janvier 1988** relatif à l'utilisation d'huiles et de graisses comestibles lors de la friture de denrées alimentaires.

**Règlement (UE) 2023/915** de la Commission du 25 avril 2023 concernant les teneurs maximales pour certains contaminants dans les denrées alimentaires et abrogeant le règlement (CE) n° 1881/2006.

### 1.2. Méthode

L'avis se base sur l'examen de la littérature et l'opinion d'experts, sur les documents de l'opérateur et sur une estimation de la formation de contaminants de procédé (amines aromatiques hétérocycliques) dans les boulettes de viande réalisée en appliquant un modèle de cinétique issu de la littérature.

## 2. Définitions & Abréviations

4,8-DiMeIQx	2-amino-3,4,8-trimethylimidazo[4,5-f]quinoxaline
7,8-DiMeIQx	2-amino-3,7,8-trimethylimidazo[4,5-f]quinoxaline
AαC	2-amino-9H-pyrido[2,3-b]indole
BMDL <sub>10</sub>	Représente la limite inférieure de l'intervalle de confiance à 95% de la <i>benchmark dose</i> . Le BMDL10 correspond à la dose à laquelle la modification de la réponse dans une population est probablement inférieure à 10 % (le terme « probablement » étant défini par le niveau de confiance statistique, généralement 95%). En d'autres termes, cela signifie qu'à un niveau d'exposition égal au BMDL10, il y a 95% de chances que 90% de la population exposée ne développe pas d'effets indésirables.
EFSA	Autorité européenne de sécurité des aliments
fer héminique	le pigment ferreux non protéique, C <sub>34</sub> H <sub>32</sub> N <sub>4</sub> O <sub>4</sub> Fe, qui fait partie de l'hémoglobine et de la myoglobine, entre autres
GB1	grande boulette de viande à base de porc (150 g ; 7,5 cm de diamètre ; temps de cuisson dans l'huile de friture : 2 minutes et 10 secondes)
GB2	grande boulette de viande à base de poulet avec œuf (100 g ; 5,5 cm de diamètre ; temps de cuisson dans l'huile de friture : 2 minutes et 35 secondes)
GB3	petite boulette de viande à base de porc (9 g ; 2,5 cm de diamètre ; temps de cuisson dans l'huile de friture : 1 minute et 50 secondes)
GB4	petite boulette de viande à base de poulet (9 g ; 2,5 cm de diamètre ; temps de cuisson dans l'huile de friture : 1 minute et 50 secondes)
GB5	petite boulette de viande à base de poulet et de bœuf (9 g ; 2,5 cm de diamètre ; temps de cuisson dans l'huile de friture : 1 minute et 50 secondes)

AAH(s)	amine(s) aromatique(s) hétérocyclique(s)
Harman	1-méthyl-9H-pyrido[3,4-b]indole
CSS	Conseil Supérieur de la Santé
IQ	2-amino-3-méthylimidazo[4,5-f]quinoléine
IQx	2-amino-3-méthylimidazo[4,5-f]quinoxaline
LRSM	<i>Low Range Shortening Monitor</i>
MeAαC	2-amino-3-méthyl-9Hpyrido[2,3-b]indole
MeIQ	2-amino-3,4-diméthylimidazo[4,5-f]quinoléine
MeIQx	2-amino-3,8-diméthylimidazo[4,5-f]quinoxaline
Meq	milli-équivalents
MOE	<i>margin of exposure</i>
N-NA(n)	N-nitrosamine(s)
Norharman	9H-pyrido[3,4-b]indole
HAP2	somme du benzo[a]pyrène et du chrysène
HAP4	somme des benzo[a]pyrène, chrysène, benz[a]anthracène et benzo[b]fluoranthène
HAP8	somme des HAP4 avec le benzo[k]fluoranthène, le benzo[ghi]pérylène, le dibenz[a,h]anthracène et l'indéno[1,2,3-cd]pyrène
HAP(s)	hydrocarbure(s) aromatique(s) polycyclique(s)
PhIP	2-amino-1-méthyl-6-fénylimidazo[4,5-b]pyridine
point de fumée	la température à laquelle une huile ou une matière grasse (notamment celle utilisée pour la cuisson) commence à dégager de la fumée
ppb	'parts per billion'; µg/kg
TD <sub>50</sub>	la dose qui provoque un effet toxique chez 50% des animaux d'expérience.
Trp-P-1	3-amino-1,4-diméthyl-5H-pyrido[4,3-b]indole
Trp-P-2	3-amino-1-méthyl-5H-pyrido[4,3-b]indole



Considérant les discussions menées durant les réunions du groupe de travail des 3 avril 2023 et 17 mai 2023 et les séances plénières du Comité scientifique du 26 mai 2023 et 23 juin 2023,

## le Comité scientifique émet l'avis suivant :

### 3. Contexte

L'arrêté royal du 22 janvier 1988 relatif à l'utilisation d'huiles et de graisses comestibles lors de la friture de denrées alimentaire stipule (article 1(2)) qu'il est interdit de préparer ou de fabriquer des aliments frits dans ou avec des huiles ou des graisses comestibles dont la température est ou a été à n'importe quel moment supérieure à 180 °C. Cette interdiction est complétée par l'obligation de régler le thermostat de manière à ce que la température de l'huile ou de la graisse ne dépasse pas 180 °C à tout moment (article 4(2)). Conformément à l'article 4 bis de cet arrêté royal, l'AFSCA peut, sur demande motivée d'un fabricant ou d'un préparateur et sur avis du Comité scientifique, accorder une dérogation aux articles 1(2) et 4, deuxième alinéa, pour le procédé de friture appliqué par le fabricant ou le préparateur. Il est à noter dans ce contexte qu'une tolérance de 2 °C sur la température de 180 °C est admise par l'AFSCA (circulaire AFSCA avec référence PCCB/S3/VVN/1148069).

Un opérateur de la chaîne alimentaire a introduit auprès de l'AFSCA une demande de dérogation pour la friture de produits à base de viande dans de l'huile dont la température est supérieure à la température maximale autorisée. La dérogation est notamment demandée pour la friture de boulettes de viande de poulet, de porc ou de bœuf dans de l'huile de tournesol raffinée (100%).

Pour la préparation des boulettes de viande, la température de la friteuse électrique est fixée à 178 °C. Toutefois, la température réelle de l'huile de friture fluctue et dépasse parfois la tolérance de 182 °C. Les boulettes de viande sont frites par lots. L'opérateur applique un programme fixe de renouvellement de l'huile de tournesol. Au début de la semaine de travail, de l'huile de friture entièrement neuve est toujours utilisée. Ensuite, à la fin de chaque journée de travail, l'huile usagée est pompée et les impuretés sont filtrées. Le lendemain matin, l'huile filtrée est repompée et complétée par de l'huile de friture neuve. La qualité de l'huile de friture est mesurée chaque jour à l'aide de bandelettes LRSM (*Low Range Shortening Monitor*). Les bandelettes LRSM mesurent la teneur en acides gras libres de l'huile de friture. La teneur doit être inférieure à 1,5 %. L'opérateur relève la température de l'huile de friture toutes les demi-heures. Si la température de l'huile dépasse 183 °C, une alarme sonore/visuelle se déclenche. Si la température dépasse 183 °C, des contrôles supplémentaires sont effectués toutes les deux minutes. Après trois mesures consécutives à deux minutes d'intervalle, la température doit à nouveau être inférieure à 183 °C. Si ce n'est pas le cas, une analyse rapide des acides gras libres est effectuée à l'aide de bandelettes LRSM. Si la teneur en acides gras libres dépasse 1,5 %, les produits sont immédiatement bloqués et détruits, et l'huile de friture est remplacée. Lorsque la température de l'huile de friture dépasse 186 °C, les produits sont toujours bloqués et détruits immédiatement, et l'huile de friture est remplacée.

Ainsi, les boulettes frites de viande dans de l'huile de tournesol dont la température a dépassé 183 °C peuvent encore être conservées sous certaines conditions, selon l'opérateur. Cet avis évalue l'absence de risque pour la santé publique lié à la consommation de ces boulettes de viande.

## 4. Introduction: analyse des risques

La friture provoque l'hydrolyse, l'oxydation et la polymérisation de l'huile de friture. L'hydrolyse augmente la quantité d'acides gras libres, de mono- et diacylglycérols et de glycérol dans l'huile. Lors de la friture d'huiles composées principalement d'acides gras polyinsaturés, l'oxydation se produit plus rapidement que l'hydrolyse. L'oxydation produit des hydroperoxydes, puis des composés volatils de faible poids moléculaire tels que des aldéhydes, des cétones, des acides carboxyliques et des alcanes et alcènes à chaîne courte. Des dimères et des polymères sont également formés dans l'huile par des réactions radicalaires et de Diels-Alder. Les changements d'huile, les conditions de friture, la qualité de l'huile de friture, les aliments, la friteuse, les antioxydants et la concentration en oxygène influencent la qualité et le goût de l'huile (Choe et Min, 2007).

Actuellement, il est recommandé d'évaluer la dégradation d'une huile de friture sur la base de la teneur en triglycérides polymérisés et la somme des composés polaires (Ben Hammouda *et al.*, 2019). Le nombre total de composés polaires prend en compte les composants de dégradation dus au rancissement oxydatif et hydrolytique. Les composés polaires se composent principalement d'oligomères de triacylglycérols oxydés, de dimères de triacylglycérols oxydés, de monomères de triacylglycérols oxydés, de diacylglycérols et d'acides gras libres (Xu *et al.*, 2019). L'indice de peroxyde est également considéré dans ce contexte, car il donne une indication des quantités de peroxydes obtenues par oxydation des acides gras. Cependant, le Conseil Supérieur de la Santé (CSS) considère que l'indice de peroxyde n'est pas utile pour les graisses de friture, car les hydroperoxydes ne sont pas stables aux températures auxquelles la friture est réalisée. En outre, une évaluation des risques peut être envisagée au cas par cas pour un nombre limité de produits d'oxydation considérés comme les plus toxiques. Par exemple, une évaluation des risques menée par le CSS s'est concentrée sur quatre molécules en fonction de leur cancérogénicité et génotoxicité (potentielle) pour l'homme : l'acroléine, le crotonaldéhyde, le malondialdéhyde et le 4-hydroxy-2-nonénal (CSS n°8310, 2011). Un autre exemple est l'estimation de l'exposition au malondialdéhyde, au 4-hydroxy-2-(E)-nonenal et au 4-hydroxy-2-(E)-hexenal via des produits alimentaires spécifiques disponibles en Belgique (Papastergiadis *et al.*, 2014).

L'huile de tournesol standard présente de bonnes propriétés pour les applications alimentaires générales et à basse température, telles que les sauces pour salades et les émulsions. Toutefois, pour les applications à haute température et la friture, les huiles à faible teneur en acides gras polyinsaturés sont plus appropriées et les huiles à forte teneur en acide oléique sont préférées (Garcés *et al.*, 2009). Les variétés à forte teneur en acide oléique des huiles de tournesol, de carthame, de maïs et d'arachide en sont des exemples (Sakurai *et al.*, 2003).

Les N-nitrosamines (N-NAs), les hydrocarbures aromatiques polycycliques (HAPs) et les amines aromatiques hétérocycliques (AAHs) sont des composés typiques dont la formation est favorisée par le traitement thermique de produits à base de viande. Ces composés sont mutagènes et cancérigènes. Outre la température et le temps de chauffage, les méthodes de chauffage diffèrent par le type de transfert de chaleur et les milieux environnants. Les types de transfert de chaleur sont, par exemple, la convection, la conduction et le rayonnement. Les milieux environnants sont par exemple le métal, l'eau, la graisse ou l'air. Les différents choix de type de transfert de chaleur et de milieu environnant se traduisent par des coefficients de transfert de chaleur différents (Gibis, 2016). Lors de la friture de produits à base de viande, l'huile entoure la viande et la chaleur est transférée à la viande par convection (Persson *et al.*, 2002).

Pendant le stockage, les aliments frits sont sujets à l'oxydation. Il est important de garantir la stabilité oxydative des produits frits à base de viande au moins jusqu'à la date limite de consommation. En effet, Shahidi (2016) décrit que les changements oxydatifs dans les produits à base de viande peuvent

conduire au développement de défauts de saveur et d'odeur, ainsi qu'à une décoloration et à d'autres pertes de qualité. La détermination de l'indice de peroxyde est une méthode conventionnelle pour mesurer l'état oxydatif des produits à base de viande.

## 5. Avis

### 5.1. *Évaluation des documents reçus dans le cadre de la demande de dérogation*

#### 5.1.1. Type et composition de l'huile de friture utilisée

Pour la friture des produits à base de viande, l'opérateur utilise de l'huile de tournesol raffinée (100%). La composition de cette huile a été fournie au Comité scientifique. Il s'agit d'une huile de tournesol standard. Même si, dans la pratique, elle est fréquemment utilisée pour la friture, elle n'est pas la mieux adaptée à cette application en raison de sa grande sensibilité à l'oxydation. Des huiles ayant une teneur plus faible en acides gras polyinsaturés et une teneur plus élevée en acides gras monoinsaturés sont plus appropriées, telles que les variétés à forte teneur en acide oléique des huiles de tournesol, de carthame, de maïs et d'arachide. C'est pourquoi une étude de la littérature a été menée sur les produits d'oxydation qui peuvent se former lors de la friture avec une huile de tournesol (voir sections 5.2.1-5.2.2).

#### 5.1.2. Type de produits à base de viande et préparation à la friture

Les types de boulettes de viande et leur préparation à la friture sont les suivants :

- grande boulette de viande à base de porc (GB1) (150 g; 7,5 cm de diamètre) – temps de cuisson dans l'huile de friture : 2 minutes et 10 secondes ;
- grande boulette de viande à base de poulet avec œuf (GB2) (100 g; 5,5 cm de diamètre) – temps de cuisson dans l'huile de friture : 2 minutes et 35 secondes ;
- petite boulette de viande à base de porc (GB3) (9 g; 2,5 cm de diamètre) – temps de cuisson dans l'huile de friture : 1 minute et 50 secondes ;
- petite boulette de viande à base de poulet (GB4) (9 g; 2,5 cm de diamètre) – temps de cuisson dans l'huile de friture : 1 minute et 50 secondes ; et
- petite boulette de viande à base de poulet et de bœuf (GB5) (9 g; 2,5 cm de diamètre) – temps de cuisson dans l'huile de friture : 1 minute et 50 secondes.

Les boulettes de viande sont cuites avant d'être frites. Les documents fournis ne décrivent pas le processus de cuisson des boulettes de viande.

#### 5.1.3. Mesures correctives de l'opérateur et évaluation des enregistrements de température de l'huile de friture

Pour vérifier la température moyenne de l'huile de friture au cours de l'opération, les enregistrements de température de l'huile ont été contrôlés pendant une période de 4 mois (du 01/06/2019 au 30/09/2019). Au cours de cette période, il y a eu 83 jours de production. Chaque semaine, 18,5 heures en moyenne ont été consacrées à la cuisson dans l'huile de tournesol. Au cours des quatre mois évalués, le maximum a été de 20 heures par semaine. La température moyenne de traitement était de 177,4 °C. La température quotidienne moyenne se situait entre 174,5 °C et 178 °C. La température de l'huile de tournesol a dépassé 180 °C à 106 reprises. Parmi ces moments de dépassement de température, 89 ont duré de 1 à 7 minutes et à 104 moments la température était inférieure ou égale à 182 °C. La température maximale était de 182,9 °C ; la période de dépassement la plus longue a duré 22 minutes. La température moyenne pendant ces dépassements était comprise entre 180,1 °C et 182,4 °C.

En plus de ces informations sur les températures, les enregistrements des températures pour la quatrième semaine de 2022 ont été mis à disposition. Au cours de cette semaine, il y a eu trois jours où la température a dépassé 180 °C une fois (sur un total de 13, 14 et 18 enregistrements de température pour les jours en question, respectivement). En outre, à chacun de ces moments, la température était inférieure à 182 °C.

En raison du processus de production par lots, la friture des boulettes de viande est sensible aux fluctuations de température. En outre, l'huile de friture est chauffée électriquement. Avec le chauffage électrique, le temps de réponse est plus lent qu'avec le chauffage au gaz, de sorte que le dépassement de la température peut être plus important. Toutefois, les enregistrements de température ci-dessus montrent qu'à l'exception de deux dépassements ponctuels de 182 °C, le processus de préparation a été maîtrisé pendant la période combinée de quatre mois et une semaine. Comme indiqué dans la section précédente, les durées de friture varient de 1 minute et 50 secondes à 2 minutes et 35 secondes en fonction du type de produit carné. Par conséquent, si la température devait dépasser 182 °C (ce qui ne s'est pratiquement jamais produit au cours de la période de contrôle), les produits à base de viande ne sont soumis à la température dépassée que pendant une période limitée. Pour ces raisons, le Comité scientifique estime qu'il est acceptable que les mesures correctives ne soient effectives qu'à partir de 183 °C (voir contexte de cet avis) et non à partir de la tolérance de 182 °C admise par l'AFSCA. Enfin, il convient de noter que dans le cadre du contrôle de qualité standard de l'huile de tournesol, l'opérateur effectue une analyse rapide des acides gras libres à l'aide de bandelettes LRSM (voir contexte). Ce n'est pas l'analyse des acides gras libres, mais la détermination de la fraction polaire totale qui est actuellement considérée comme la méthode la plus précise pour déterminer l'état de dégradation de l'huile ou de la graisse de friture. Le plus grand choix de tests rapides est disponible pour ce paramètre analytique (AFSCA, 2021). Sur cette base, le Comité scientifique considère qu'une mesure des substances polaires est plus pertinente pour le contrôle de qualité de l'huile de tournesol qu'une analyse des acides gras libres. La teneur mesurée en substances polaires devrait alors être testée par rapport à la norme légale de 25%.

D'après les informations présentées ci-dessus, le Comité scientifique considère a priori que le risque pour la santé publique lié à la consommation des produits frits à base de viande est limité. Pour confirmer ou non cette estimation a priori, le Comité scientifique a évalué les divers paramètres de processus mesurés par l'opérateur, a réalisé une analyse documentaire des dangers potentiels et a estimé la formation de contaminants de processus (AAHs) au moyen d'un modèle de cinétique issu de la littérature.

#### 5.1.4. Évaluation des résultats d'analyse pour l'huile de friture et les produits à base de viande

L'opérateur a effectué des analyses sur l'huile de tournesol et les différentes boulettes de viande. Il faut préciser qu'en plus de l'analyse de sa procédure standard, l'opérateur a également effectué des analyses sur de l'huile de friture ayant été chauffée de manière excessive. Ce chauffage excessif de l'huile de friture ne fait en aucun cas partie du processus de friture standard de l'opérateur, mais a été effectué pour évaluer la sécurité du processus de friture et la pertinence des mesures correctives. Pour ce chauffage excessif, de l'huile de tournesol qui avait déjà été utilisée pendant une semaine dans des conditions standard a été chauffée pendant 25 minutes à 183 °C. Des explications supplémentaires sur les analyses et leurs résultats sont résumés dans le **Tableau 1** ci-dessous.

##### Huile de friture

L'arrêté royal du 22 janvier 1988 relatif à l'utilisation d'huiles et de graisses comestibles lors de la friture de denrées alimentaire prévoit plusieurs exigences auxquelles l'huile de friture utilisée par l'opérateur doit répondre, notamment :

- une teneur en acides gras libres inférieure à 2,5 g/100 g ;

- une teneur en triglycérides dimérisés et polymérisés inférieure à 10 g/100 g ;
- une teneur en matières polaires inférieure à 25 g/100 g ;
- une viscosité inférieure à 27 mPa·s mesurée à 50 °C ; et
- un point de fumée supérieur à 170 °C.

Dans ce contexte, il convient de mentionner qu'il n'existe pas de limite maximale fixée en Belgique pour la teneur en peroxyde de l'huile. Le Codex Alimentarius autorise un indice de peroxyde allant jusqu'à 15 meq O<sub>2</sub>/kg dans l'huile vierge et les huiles et graisses pressées à froid, et jusqu'à 10 meq O<sub>2</sub>/kg dans les autres graisses et huiles (Codex Alimentarius, 1999).

Les niveaux maximum mesurés d'acides gras libres (acide oléique de la graisse) (0,8 g/100 g), de triglycérides dimériques et polymériques (6,3 g/100 g) et de substances polaires (11,5 g/100 g) dans l'huile de tournesol étaient conformes aux normes définies dans l'arrêté royal du 22 janvier 1988. La teneur maximale en peroxyde de l'huile de tournesol était de 7,4 mEq O<sub>2</sub>/kg. Dans les conditions testées, l'huile de tournesol est donc conforme aux normes applicables. L'opérateur a également indiqué que l'huile de tournesol avait une viscosité de 63 mPa·s à 20 °C (sur la base de données bibliographiques). Garcia Rojas *et al.* (2013) ont étudié la relation entre la viscosité de l'huile de tournesol et la température. Si l'on considère la relation entre la température et la viscosité de cette étude, la viscosité communiquée par l'opérateur mesurée à 20 °C correspond à une viscosité de 21 mPa·s si elle avait été mesurée à 50 °C, ce qui est conforme à la norme légale. Enfin, l'opérateur a indiqué que l'huile de tournesol a un point de fumée de 209 °C (bien que basé sur des données bibliographiques), ce qui répond également aux normes applicables.

#### Produits à base de viande

L'opérateur a effectué des analyses sur des boulettes de viande préparées selon un processus de friture standard (voir section 5.1.2). Pour les boulettes frites de viande, l'indice de peroxyde a été déterminé comme pour l'huile de friture. L'indice de peroxyde a été déterminé immédiatement après la friture des boulettes de viande et également après un stockage réfrigéré jusqu'à la fin de la durée de vie.

Les documents mis à disposition n'indiquent pas clairement comment l'indice de peroxyde a été mesuré. Si la graisse a d'abord été extraite selon le procédé Weibull<sup>1</sup>, et que l'indice de peroxyde a été déterminé ensuite, cela ne donne que peu d'informations sur la stabilité à l'oxydation. En effet, la graisse peut s'oxyder lors de l'extraction. C'est pourquoi, dans ce qui suit, l'analyse de la littérature et l'avis d'experts sont utilisés pour déterminer le risque sanitaire associé à la stabilité oxydative des produits à base de viande.

En outre, la teneur en acrylamide a été déterminée pour les boulettes frites de viande. Toutefois, la mesure de la teneur en acrylamide dans les produits frits à base de viande n'a qu'une valeur ajoutée limitée. Les critères pertinents pour la formation d'acrylamide sont la présence de composés protéiques de faible poids moléculaire (par exemple, des acides aminés et principalement de l'asparagine) et de sucre réducteur (fructose, glucose), une température élevée et une faible disponibilité en eau à l'intérieur d'un aliment (Matthäus *et al.*, 2004). Étant donné que les produits à base de viande n'étaient pas panés, la formation d'acrylamide à des températures élevées n'est pas considérée comme un risque pertinent.

---

<sup>1</sup> La norme ISO 1443a, également connue sous le nom de "Weibull", décrit une méthode de référence pour déterminer la teneur en matières grasses totales de la viande et des produits à base de viande. La graisse est obtenue par hydrolyse acide à température élevée et ne peut donc pas être utilisée pour déterminer les caractéristiques de la graisse.

En outre, l'opérateur a évalué l'absorption d'huile des boulettes de viande en mesurant la teneur en eau et la teneur en graisse après hydrolyse acide. L'absorption d'huile a été observée dans certains cas, tandis que dans d'autres cas, les produits à base de viande ont libéré des graisses dans l'huile de friture. Le degré d'absorption d'huile peut être évalué en déterminant la teneur en matières grasses sur la base de la matière sèche dégraissée. Cette teneur en matières grasses sur la base de la matière sèche dégraissée peut être calculée à partir des données de détermination de l'humidité et des matières grasses du **Tableau 1**. Lorsque les boulettes de viande sont comparées avant et après la friture, on obtient les fourchettes suivantes d'absorption d'huile (positive) et/ou de libération de graisse (négative) : GB1 : -7% à +6% ; GB2 : +4% à +9% ; GB3 : -15% à -2% ; GB4 : -12% à -7% ; et GB5 : +9% à +17%. Même pour les boulettes de viande qui libère de la graisse, en raison de l'immersion dans l'huile de tournesol à des températures élevées, on peut supposer un certain degré d'absorption d'huile au cours de la friture. En raison de l'absorption d'huile, des contaminants de processus potentiellement formés dans l'huile de tournesol peuvent pénétrer dans les produits à base de viande.

### 5.1.5. Conclusion

Les résultats d'analyse de l'huile de friture et des produits frits à base de viande, fabriqués par l'opérateur permettent de conclure que l'opérateur contrôle bien son processus de friture. Les paramètres mesurés de l'huile de tournesol sont conformes aux exigences légales. Ce qui indique que l'oxydation de l'huile de tournesol est limitée. Le risque pour la santé publique lié à la consommation des produits frits à base de viande est jugé faible. Afin d'étayer le processus décisionnel, une analyse de la littérature scientifique disponible sur les dangers potentiels du processus de friture a été réalisée et est présentée dans la section suivante.

**Tableau 1.** Analyses communiquées par l'opérateur pour appuyer sa demande de dérogation relative à la température de friture

<b>matrice</b>	<b>traitement</b>	<b>paramètre (unité)</b>	<b>résultats <sup>a</sup></b>	<b>Méthode d'analyse</b>
huile de tournesol	huile fraîche (non utilisée)	acides gras libres (acide oléique sur la graisse) (g/100 g)	< 0,1 / < 0,1 / < 0,1	basée sur EU2016/1227a
		triglycérides dimériques et polymériques (g/100 g)	0,5 / < 0,5 / < 0,5	SM00114 (Oleotest)
		substances polaires sur la graisse (g/100 g)	2,6 / 3,5 / 9,1	SM00113 (CN)
		indice de peroxyde (meq/kg)	3,0 / 2,7 / 2,6	basée sur EEG 2568/91a
	huile après une demi-semaine (usage normal <sup>b</sup> ): - partie de l'huile usagée est remplacée par de l'huile neuve - partie huile usagée	acides gras libres (acide oléique sur la graisse) (g/100 g)	0,4 / 0,4 / 0,4	basée sur EU2016/1227a
		triglycérides dimériques et polymériques (g/100 g)	4,3 / 4,3 / 4,3	SM00114 (Oleotest)
		substances polaires sur la graisse (g/100 g)	9,4 / 8,9 / 9,0	SM00113 (CN)
		indice de peroxyde (meq/kg)	2,5 / 2,2 / 2,4	basée sur EEG 2568/91a
	huile après une semaine (usage normal <sup>b</sup> )	acides gras libres (acide oléique sur la graisse) (g/100 g)	0,5 / 0,5 / 0,5	basée sur EU2016/1227a
		triglycérides dimériques et polymériques (g/100 g)	4,9 / 4,9 / 4,9	SM00114 (Oleotest)
		substances polaires sur la graisse (g/100 g)	10,2 / 9,4 / 9,0	SM00113 (CN)
		indice de peroxyde (meq/kg)	2,9 / 3,0 / 3,3	basée sur EEG 2568/91a
	huile après une semaine d'utilisation normale <sup>z</sup> + chauffée à 183 °C pendant 25 minutes <sup>c</sup>	acides gras libres (acide oléique sur la graisse) (g/100 g)	0,8 / 0,7 / 0,8	basée sur EU2016/1227a
		triglycérides dimériques et polymériques (g/100 g)	6,2 / 6,3 / 6,3	SM00114 (Oleotest)
		substances polaires sur la graisse (g/100 g)	11,5 / 10,8 / 10,9	SM00113 (CN)
		indice de peroxyde (meq/kg)	7,4 / 7,2 / 7,4	basée sur EEG 2568/91a
boulettes de viande <sup>d</sup>	avant la friture (cuites)	eau (g/100 g) <sup>z</sup>	GB1: 54,7 / 55,1 / 55,2 / 55,0 GB2: 60,6 / 61,1 / 61,2 / 61,2 GB3: 56,9 / 56,9 / 57,2 / 57,0 GB4: 57,9 / 58,0 / 58,0 / 58,0 GB5: 59,6 / 58,9 / 58,8 / 59,2	basée sur ISO 1442a
		graisse après hydrolyse acide (Weibull) (g/100 g) <sup>e</sup>	GB1: 21,5 / 22,5 / 21,1 / 21,2 GB2: 15,4 / 14,8 / 14,9 / 15,4 GB3: 19,8 / 19,8 / 19,6 / 20,2 GB4: 18,8 / 19,1 / 19,0 / 18,8 GB5: 14,7 / 15,8 / 15,3 / 15,5	basée sur ISO 1443a
	friture selon le procédé normal <sup>b</sup>	eau (g/100 g) <sup>e</sup>	GB1: 53,0 / 52,7 / 53,0 / 52,6 GB2: 57,9 / 57,1 / 57,6 / 57,3 GB3: 52,3 / 52,0 / 52,6 / 52,7 GB4: 49,7 / 49,5 / 50,0 / 47,9 GB5: 48,5 / 48,5 / 48,2 / 48,5	basée sur ISO 1442a

		graisse après hydrolyse acide (Weibull) (g/100 g) <sup>e</sup>	GB1: 23,1 / 22,8 / 22,9 / 22,7 GB2: 17,0 / 17,6 / 17,7 / 17,5 GB3: 21,3 / 21,8 / 21,1 / 20,1 GB4: 21,1 / 21,9 / 21,4 / 20,5 GB5: 21,3 / 22,8 / 21,0 / 21,2	basée sur ISO 1443a
		indice de peroxyde (meq/kg)	GB1: 1,8 / 2,5 / 2,5 / 2,0 GB2: 1,1 / < 1,0 / < 1,0 / < 1,0 GB3: 3,9 / 2,0 / 2,6 / 2,7 GB4: 2,2 / 2,2 / 1,9 / 1,7 GB5: 1,1 / < 1,0 / 1,7 / 1,7	basée sur EEG 2568/91a
		acrylamide (µg/kg)	GB1: < 20 / < 20 / < 20 / < 20 GB2: < 20 / < 20 / < 20 / < 20 GB3: < 20 / 32 / 35 / 35 GB4: < 20 / < 20 / < 20 / < 20 GB5: < 20 / < 20 / < 20 / < 20	SM01400a
	friture selon le procédé normal <sup>b</sup> suivi par l'entreposage frigorifique <sup>f</sup> jusqu'au date limite de consommation	indice de peroxyde (meq/kg)	GB1: 4,4 / 2,7 / 6,0 / 1,8 GB2: 1,8 / 1,9 / 2,2 / 3,0 GB3: 2,9 / 5,4 / 2,4 / 2,5 GB4: 4,5 / 4,2 / 2,8 / 2,5 GB5: 2,5 / 2,5 / 2,9 / 4,3	basée sur EEG 2568/91a
		acrylamide (µg/kg)	GB1: < 20 / < 20 / < 20 / < 20 GB2: < 20 / < 20 / < 20 / < 20 GB3: 27 / 30 / < 20 / < 20 GB4: < 20 / < 20 / < 20 / < 20 GB5: < 20 / < 20 / < 20 / < 20	SM01400a

<sup>a</sup> Des analyses multiples (3 répétitions pour l'huile de tournesol et 4 répétitions pour les boulettes de viande) ont été effectuées pour chaque paramètre et pour chaque produit afin de garantir la reproductibilité des résultats.

<sup>b</sup> Dans le cadre d'une utilisation normale ou d'un procédé normal, la température de friture réglée est de 178 °C.

<sup>c</sup> Un chauffage de 25 minutes à 183 °C a été effectué pour vérifier si l'évaluation avec les bandelettes LRSM est suffisante en cas de dépassement ponctuel de la température maximale de friture.

<sup>d</sup> L'opérateur produit cinq types de boulettes de viande. GB1 est une grande boulette de viande à base de porc (150 g ; 7,5 cm de diamètre ; temps de cuisson dans l'huile de friture : 2 minutes et 10 secondes). GB2 est une grande boulette de viande à base de poulet avec œuf (100 g ; 5,5 cm de diamètre ; temps de cuisson dans l'huile de friture : 2 minutes et 35 secondes). GB3 est une petite boulette de viande à base de porc (9 g ; temps de cuisson dans l'huile de friture : 1 minute et 50 secondes). GB4 est une petite boulette de viande à base de poulet (9 g ; temps de cuisson dans l'huile de friture : 1 minute et 50 secondes). GB5 est une petite boulette de viande à base de poulet et de bœuf (9 g ; 2,5 cm de diamètre; temps de cuisson dans l'huile de friture : 1 minute et 50 secondes).

<sup>e</sup> Sur la base des déterminations de l'eau et des graisses après hydrolyse acide, l'absorption d'huile peut être estimée.

<sup>f</sup> Le stockage réfrigéré dépend du type de boulette de viande : GB1 a été stockée pendant 37 jours à 0-2 °C et puis 35 jours à 4 °C. GB2 a été stockée pendant 37 jours à 0-2 °C et puis 28 jours à 4 °C. GB3-GB5 ont été stockées pendant 37 jours à 0-2 °C et puis 45 jours à 4 °C.



## 5.2. Analyse de la littérature

### 5.2.1. Oxydation de l'huile de tournesol

Plusieurs réactions se produisent simultanément au cours du processus de friture. L'hydrolyse des triglycérides en acides gras libres, di- et monoglycérides peut se produire notamment sous l'influence de l'eau présente, qui provient souvent des aliments frits. Il en résulte une augmentation des acides gras libres, qui constituent un critère courant de la qualité de la graisse de friture utilisée. L'oxydation se produit avec la formation d'intermédiaires connus tels que les hydroperoxydes. Toutefois, ces derniers ne sont pas stables aux températures du processus de friture. Le CSS a publié en 2011 un avis sur l'oxydation des huiles et des graisses mais n'indique pas à quelle vitesse les hydroperoxydes se décomposent à ces températures plus élevées. En cas d'oxydation importante, les radicaux subissent une recombinaison avec formation de dimères et de trimères non radicalaires. Cette réaction de terminaison est également appelée réaction de fin de chaîne. Étant donné la nature des radicaux, elle implique à la fois des dimères et des trimères thermiques (sans liaison –O– entre les chaînes) et des dimères et des trimères oxydatifs (avec –O– entre les chaînes). À haute température, des composés cycliques se forment à partir d'acides gras insaturés. Pour ces raisons, la température autorisée dans les processus de friture est limitée à 180 °C (CSS n°8310, 2011).

La stabilité thermo-oxydative des huiles végétales dépend principalement de la quantité d'acides gras polyinsaturés qu'elles contiennent (les huiles à forte teneur en ces acides gras insaturés, comme l'huile de tournesol, sont plus instables), ainsi que de la teneur et du type de tocophérols (Garcés *et al.*, 2009). Dans une étude de ces auteurs, plusieurs huiles ont été chauffées à une température de 180 °C pendant 10 heures. En utilisant un niveau de rejet de 12 % de triacylglycérides polymérisés, les huiles standard analysées, notamment l'huile de soja, de canola et de tournesol standard, ont été rejetées dans ces conditions. L'huile de tournesol à haute teneur en acide oléique pouvait encore être utilisée après 10 heures ainsi que l'huile de tournesol à haute teneur en acide palmitique et en acide oléique qui présentait un taux de triacylglycérides polymérisés encore inférieurs à la précédente.

Dans l'étude de Quiles *et al.* (2002), la friture à 180 °C a diminué la teneur en antioxydants, en particulier l' $\alpha$ -tocophérol et d'autres phénols, dans l'huile de tournesol, tout en augmentant la teneur totale en substances polaires. Dans cette même étude, des rats ayant ingéré de l'huile chauffée ont présenté des niveaux plus élevés de peroxydation lipidique microsomale et une concentration plus faible d'antioxydants plasmatiques. Les profils d'acides gras et d'antioxydants des microsomes ont également été modifiés. Cette étude montre qu'il semble y avoir une relation étroite entre la perte d'antioxydants, la production de composés toxiques dans l'huile de tournesol pendant la friture et l'ampleur des processus de peroxydation microsomale.

### 5.2.2. Formation d'hydrocarbures aromatiques polycycliques dans l'huile de tournesol

La formation ou l'accumulation de HAPs dans les aliments peut être causée par les processus de fumage, la pyrolyse (combustion), la contamination par une huile minérale, la contamination par des contaminants environnementaux ou l'oxydation des graisses. Les HAPs désignent des composés organiques constitués de cycles aromatiques condensés. On distingue les HAPs "légers", constitués de trois ou quatre cycles, et les HAPs "lourds", qui possèdent au moins cinq cycles condensés. Le benzo[a]pyrène, qui possède cinq cycles aromatiques, est le membre le plus important de la famille des HAPs (Raters et Matissek, 2014). Après avoir évalué les données des États membres sur la présence de HAPs cancérigènes dans les aliments, le groupe CONTAM de l'Autorité européenne de sécurité des aliments (EFSA) a décidé en 2008 que la somme du benzo[a]pyrène, du chrysène, du benzo[a]anthracène et du benzo[b]fluoranthène, collectivement appelés HAP4, était un indicateur approprié de la présence de HAPs dans les aliments (EFSA, 2008). Cet indicateur est meilleur que le benzo[a]pyrène pris individuellement ou le HAP2 (somme du benzo[a]pyrène et du chrysène). Le HAP8, la somme du HAP4 et du benzo[k]fluoranthène, du benzo[ghi]perylène, du

dibenz[a,h]anthracène et de l'indeno[1,2,3-cd]pyrène, a peu de valeur ajoutée par rapport au HAP4, selon l'EFSA.

Srivastava *et al.* (2010) ont étudié les risques génotoxiques et cancérigènes associés à la consommation d'huile de tournesol chauffée une fois ou six fois consécutivement pendant 30 minutes à son point de fumée de 280 °C. Une plus grande quantité de HAPs cancérigènes/mutagènes connus a été observée dans l'huile de tournesol chauffée plusieurs fois que dans les huiles fraîches ou chauffées une seule fois. Plus précisément, la quantité de HAPs dans l'huile de tournesol chauffée six fois (236 µg/kg) était quatre fois et deux fois plus élevée que dans les huiles non chauffées et chauffées une seule fois, respectivement. La teneur en HAP4 de l'huile de tournesol chauffée six fois était de 48 µg/kg, dépassant la limite européenne de 10 µg/kg (voir le règlement (UE) 2023/915). D'autre part, les auteurs ont administré à des rats jusqu'à 0,5 millilitre d'huile de tournesol par jour pendant une semaine, après quoi les animaux ont été examinés. Selon les chercheurs, la consommation d'huile de tournesol dégradée thermiquement et chauffée à plusieurs reprises a entraîné une génotoxicité significative, via un stress oxydatif induit, et a conduit à des changements pré-néoplasiques dans le foie des rats, et peut donc constituer un risque pour la santé humaine. Il convient toutefois de noter qu'en plus des HAPs formés, de nombreux autres composés peuvent être à l'origine de la toxicité.

Zhu *et al.* (2018) ont fait frire des arachides pendant 192 heures à une température de 150 °C dans de l'huile de soja et deux mélanges huile d'oléine de palme super/huile de soja/huile de tournesol à haute teneur en oléine dans des rapports de volume de 2:2:1 ("mélange 1") et de 3:2:1 ("mélange 2"), respectivement. Un échantillon (30 millilitres) de l'huile de friture (volume total de 4,5 litres) a été prélevé à chaque fois après 6 heures de friture, après quoi l'huile de friture a toujours été reportée à son volume initial avec de l'huile fraîche. Pour chaque type d'huile, l'évolution de la teneur totale en composants polaires et en HAPs, entre autres, a été examinée. Il a été constaté que ces paramètres augmentaient avec la durée de friture. Dans le cas des mélanges contenant de l'huile de tournesol, la limite européenne de benzo[a]pyrène (2 µg/kg) n'a pas été dépassée même après 192 heures (mesures d'environ 0,55 µg/kg et d'environ 0,38 µg/kg dans les mélanges 1 et 2, respectivement). La limite européenne de HAP4 (10 µg/kg) n'a pas non plus été dépassée après 192 heures, avec des niveaux de HAP4 d'environ 5,3 µg/kg pour les deux mélanges. De même, la limite européenne pour les composants polaires totaux (27 %) dans les mélanges 1 et 2 n'a pas été dépassée après 192 heures de friture à 150 °C (mesures d'environ 14,7 µg/kg et d'environ 15,7 µg/kg, respectivement).

En conclusion concernant l'étude de Zhu *et al.* (2018), seule une formation limitée des HAPs a été observée lors d'une friture prolongée (jusqu'à 192 heures) dans une huile (huile de soja ou mélanges d'huile de tournesol avec d'autres types d'huiles) à une température de 150 °C. Il est surprenant que la qualité des huiles reste aussi bonne après 192 heures de friture. Une explication possible est que l'huile contenue dans les arachides (environ 50 % du poids d'une arachide) est dans une mesure importante transférée à l'huile de friture et qu'une sorte de *steady state* est créé. En outre, il n'est pas exclu que les HAPs proviennent à l'origine des cacahuètes. Si les cacahuètes ont été séchées au moyen d'un feu de bois par exemple, on peut s'attendre à ce qu'elles contiennent des HAPs. L'étude de Zhu *et al.* (2018) ne permet donc pas de conclure sans équivoque que les HAPs ont effectivement été formés au cours du processus de friture (en considérant que la migration des HAPs des arachides vers l'huile ne peut pas être exclue).

Iwegbue *et al.* (2020) ont frit du poisson dans six types d'huile végétale, dont l'huile de tournesol. Pour la préparation, 200 millilitres d'huile ont été placés dans une poêle à frire et chauffés à une température de 150-180 °C pendant 3-5 minutes sur un feu à gaz. Le poisson a ensuite été frit dans l'huile pendant 3 à 7 minutes (jusqu'à ce qu'il brunisse) à une température de 150 à 180 °C. L'huile a ensuite été refroidie à température ambiante, puis laissée telle quelle pendant 24 heures avant de

frir une autre portion de poisson le lendemain. Ainsi, chaque huile a été utilisée trois fois pour frire une portion de poisson. Des échantillons de l'huile non chauffée et de l'huile chauffée après chaque cycle de friture ont été analysés pour 22 HAPs différents. La somme des concentrations des 22 HAPs était la suivante pour l'huile de tournesol : 137 µg/kg (huile non chauffée), 72,6 µg/kg (huile après le premier cycle de friture), 142 µg/kg (huile après le deuxième cycle de friture) et 121 µg/kg (huile après le troisième cycle de friture). Au cours des différents cycles de friture, la concentration des HAPs a donc globalement diminué pour l'huile de tournesol. Selon les auteurs, la diminution de la concentration des HAPs entre l'huile non chauffée et l'huile après le premier cycle de friture est due à la volatilisation, tandis que la transformation des HAPs de faible poids moléculaire en HAPs de poids moléculaire élevé expliquerait les différences de concentration globale des HAPs entre le premier et le deuxième cycle de friture. Pour le benzo[a]pyrène, les concentrations dans l'huile de tournesol étaient inférieures à la limite européenne de 2 µg/kg : des concentrations de 0,70 µg/kg (huile non chauffée), 0,45 µg/kg (huile après le premier cycle de friture), 0,16 µg/kg (huile après deux cycles de friture) et 0,03 µg/kg (huile après le troisième cycle de friture) ont été mesurées. Pour l'huile de tournesol non chauffée, une concentration de HAP4 de 15,1 µg/kg a été mesurée. Ce chiffre dépasse la norme européenne de 10 µg/kg, ce qui est plutôt inattendu pour une huile non chauffée. Les auteurs ne fournissent toutefois aucune explication à ce sujet. Dans l'huile de tournesol chauffée, les concentrations de HAP4 étaient inférieures à la limite européenne après le premier et le deuxième cycle de friture et juste au-dessus après le troisième cycle de friture : des concentrations de 3,41 µg/kg (huile après le premier cycle de friture), 3,49 µg/kg (huile après deux cycles de friture) et 10,7 µg/kg (huile après le troisième cycle de friture) ont été mesurées. Les auteurs ont également déterminé la *margin of exposure* (MOE) sur la base de la concentration de benzo[a]pyrène et des indicateurs suggérés par l'EFSA (HAP2, HAP4 et HAP8). Pour les adultes, la MOE pour le HAP8 dans l'huile de tournesol était inférieure à 10000 après deux cycles de friture. Pour les enfants, une MOE inférieure à 10000 a été observée pour le HAP4 dans l'huile de tournesol non chauffée et après deux et trois cycles de friture, tandis qu'une MOE inférieure à 10000 a été observée pour le HAP8 dans l'huile de tournesol non chauffée et après tous les cycles de friture. Ainsi, l'huile de tournesol analysée présenterait généralement un risque pour la santé des enfants, selon ces auteurs.

Dans l'étude de Iwegbue *et al.* (2020), les niveaux de benzo[a]pyrène et de HAP4 dans l'huile de tournesol chauffée se situent généralement dans les limites européennes, tandis que sur la base du HAP4, entre autres, l'huile de tournesol (non chauffée et chauffée) est considérée comme présentant un risque pour la santé des enfants. Toutefois, dans cette même étude, les niveaux de HAP4 dépassaient déjà la limite européenne dans l'huile non chauffée, de sorte qu'il convient de faire preuve d'une certaine prudence dans l'adoption des conclusions de l'étude. En outre, les variations de concentration des HAPs dans l'huile de tournesol en fonction du nombre de fritures ne sont pas très cohérentes avec ce que l'on pourrait attendre de l'oxydation de l'huile. D'autre part, dans l'étude de Iwegbue *et al.* (2020), seules des augmentations limitées sont observées dans les composés HAP à deux ou trois cycles en raison de la friture. On s'attendait à ce que seuls ces composés HAP augmentent à la suite du traitement par friture. Cette étude ne permet pas non plus de conclure sans équivoque que les HAPs ont été formés au cours du processus de friture. En effet, aucune augmentation cohérente de la teneur en HAPs correspondant à l'augmentation attendue de l'état d'oxydation de l'huile n'a été observée.

An *et al.* (2017) ont fait frire des bâtonnets de pâte (10 × 2 × 1 cm), un petit-déjeuner chinois traditionnel, pendant 32 h dans différents types d'huiles comestibles à une température de 190 ± 2 °C (64 lots de bâtonnets de pâte frits chacun pendant 30 min). Un échantillon de l'huile frite a été prélevé toutes les demi-heures. Pour l'huile de tournesol, la limite européenne de benzo[a]pyrène (2 µg/kg) a été dépassée après huit heures de friture. En particulier, un niveau de benzo[a]pyrène d'environ 2,5 µg/kg a été mesuré après huit heures. Après 12 heures de friture, la limite européenne de HAP4 (10 µg/kg) a été dépassée, avec un niveau de HAP4 d'environ 10,6 µg/kg. Les niveaux des HAPs pendant la friture ont augmenté de manière directement proportionnelle aux composants polaires formés. Selon les auteurs, la mesure des composants polaires totaux permet de surveiller la formation des HAPs dans

l'huile de tournesol. Les auteurs mentionnent que dans de nombreux pays européens, il est obligatoire de jeter l'huile de friture à partir du moment où la teneur totale en composants polaires dépasse 24-27%. Dans leur étude, une teneur totale en composants polaires de 27% n'a été dépassée dans l'huile de tournesol qu'après 28 heures de friture (mesure de  $26,9 \pm 0,9\%$ ). Comme les limites européennes pour les HAPs étaient déjà dépassées après des temps de friture beaucoup plus courts, les auteurs ont indiqué que le critère de rejet pour la teneur totale en composants polaires dans l'huile de friture devrait être recalculé pour inclure les HAPs.

Dans l'étude de An *et al.* (2017), les limites européennes pour le benzo[a]pyrène et les HAP4 ne sont dépassées qu'après de très longues périodes de friture à 190 °C. Le Comité scientifique souhaite également noter que la durée de friture des bâtonnets de pâte était très longue. La formation des HAPs par des réactions pyrolytiques dans le produit lui-même ne peut donc pas être exclue. Les HAPs étant liposolubles, on ne peut pas exclure un transfert de ces composants des bâtonnets de pâte vers l'huile et un enrichissement de ces composants dans l'huile. Dans ce cas également, le Comité scientifique conclut qu'il n'a pas été clairement démontré que les HAPs se forment à la suite de l'oxydation de l'huile au cours de la friture..

La viande contient du fer héminique. Ce fer héminique a un effet pro-oxydant (Min *et al.*, 2008). La viande rouge (par exemple le bœuf) contient plus de fer héminique que la viande blanche (par exemple le poulet) et le porc (Min *et al.*, 2008 ; Chiang et Quek, 2017). Toutefois, la littérature ne fournit aucune preuve que la formation des HAPs dans l'huile de tournesol est un phénomène lié à l'oxydation. Ainsi, l'éventuelle formation des HAPs dans l'huile de tournesol stimulée par le fer héminique n'est pas étayée par des données expérimentales.

### 5.2.3. Formation d'hydrocarbures aromatiques polycycliques dans les produits frits à base de viande

Selon un avis de l'EFSA, les aliments fumés et grillés peuvent contribuer de manière significative à l'ingestion de HAPs s'ils constituent une part importante du régime alimentaire. En ce qui concerne la viande, des concentrations élevées de HAPs ont été signalées pour la viande grillée au charbon de bois/barbecue, ainsi que pour la viande grasse et les produits à base de viande grillés dans des conditions prolongées et extrêmes (EFSA, 2008). Toutefois, l'avis de l'EFSA ne mentionne pas les produits frits à base de viande. En ce qui concerne les limites maximales légales, la "viande fumée et les produits à base de viande fumée" est la seule catégorie de viande pour laquelle une limite maximale (2,0 µg/kg de poids frais) est indiquée pour le benzo[a]pyrène. L'analyse bibliographique plus récente de Singh *et al.* (2016) a également révélé que les concentrations des HAPs les plus élevées dans les produits à base de viande se trouvaient dans les produits à base de viande cuits au barbecue ou fumés.

Sur la base de la littérature disponible, aucune donnée n'a été trouvée montrant la formation des HAPs dans les produits à base de viande pendant la friture.

### 5.2.4. Formation de N-nitrosamines dans les produits frits à base de viande

Un avis scientifique récent de l'EFSA passe en revue l'évaluation des risques liés à la présence de N-NAs dans les aliments (EFSA, 2023). Les N-NAs sont formés par une réaction entre le nitrite et certaines amines secondaires et tertiaires. Les N-NAs sont génotoxiques et provoquent des tumeurs du foie chez les rongeurs. L'évaluation des risques s'est limitée aux dix N-NAs cancérigènes présentes dans les aliments. Ces dix N-NAs et leur valeur de BMDL<sub>10</sub> et/ou TD<sub>50</sub> (en mg/kg pc par jour) sont les suivantes : N-nitrosodiméthylamine (BMDL<sub>10</sub> : 0,035 ; TD<sub>50</sub> : 0,0959), N-nitrosométhyléthylamine (BMDL<sub>10</sub> : 0,010 ; TD<sub>50</sub> : 0,05), N-nitrosodiéthylamine (TD<sub>50</sub> : 0,0265), N-nitrosodipropylamine (TD<sub>50</sub> : 0,186), N-nitrosodibutylamine (TD<sub>50</sub> : 0,691), N-nitrosométhylaniline (TD<sub>50</sub> : 0,142), N-nitrososarcosine (TD<sub>50</sub> : 0,982), N-nitrosomorpholine (BMDL<sub>10</sub> : 0,014 ; TD<sub>50</sub> : 0,109), N-nitrosopipéridine (BMDL<sub>10</sub> : 0,062 ; TD<sub>50</sub>

: 1,11) et *N*-nitrosopyrrolidine (BMDL<sub>10</sub> : 0,127 ; TD50 : 0,799). Selon l'avis de l'EFSA, la « viande et les produits à base de viande » constituent la principale catégorie d'aliments contribuant à l'exposition aux *N*-NAs cancérigènes.

L'avis de l'EFSA indique que la viande non transformée et non cuite peut contenir des traces des *N*-NAs, tandis que la présence des *N*-NAs dans ces aliments augmente après la cuisson (friture, rôtissage, grillade, micro-ondes), selon l'étude de Yurchenko et Mölder (2007), ce qui indique que la cuisson génère des *N*-NAs. Toutefois, l'effet de la friture sur la formation des *N*-NAs dans les produits à base de viande n'a pas été étudié par Yurchenko et Mölder (2007). L'avis de l'EFSA indique que les données disponibles sur la viande cuite non transformée dans l'étude de Yurchenko et Mölder (2007) sont limitées et peuvent ne pas être représentatives de l'effet des différents types de traitements thermiques sur la formation des *N*-NAs, et qu'il existe également une certaine incertitude quant à la présence ou l'absence éventuelle de nitrites/nitrates ajoutés aux produits cuits pendant l'étude et/ou déjà achetés à l'état cuit.

Dans l'étude de Yurchenko et Mölder (2007), les niveaux de cinq *N*-NAs ont été déterminés dans divers produits à base de viande crus et cuits provenant d'Estonie, à savoir la *N*-nitrosodiméthylamine, la *N*-nitrosodiéthylamine, la *N*-nitrosodibutylamine, la *N*-nitrosopipéridine et la *N*-nitrosopyrrolidine. Dans cette étude, aucun *N*-NA n'a pu être détecté dans le bœuf, le porc et la volaille crus. Ceci est cohérent avec l'étude de Howe et al (1986), où la *N*-nitrosodiméthylamine n'a pas été détectée dans la viande de porc (6% de nitrite ; type de préparation de la viande de porc inconnu). Dans l'étude de Yurchenko et Mölder (2007), les *N*-NAs ont été mesurées dans le porc et la volaille traités thermiquement. Ainsi, des valeurs moyennes de 1 µg/kg de *N*-nitrosodiméthylamine, 0,7 µg/kg de *N*-nitrosodiéthylamine, 15 µg/kg de *N*-nitrosopyrrolidine, 1 µg/kg de *N*-nitrosopipéridine et 0,3 µg/kg de *N*-nitrosodibutylamine ont été détectées dans de la volaille rôtie (détails du traitement thermique inconnus). La viande de porc (galette, épaisseur inconnue) a été grillée avec de l'huile d'olive de chaque côté pendant 30 minutes dans une poêle chauffée à 150 °C. Il convient de noter que le fait de chauffer une longe de porc pendant une heure est un traitement extrême, de sorte que la formation des *N*-NAs en quantités plus importantes ne peut être exclue. Des valeurs moyennes de 1 µg/kg de *N*-nitrosodiméthylamine, 0,7 µg/kg de *N*-nitrosodiéthylamine, 10 µg/kg de *N*-nitrosopyrrolidine, 1 µg/kg de *N*-nitrosopipéridine et 0,3 µg/kg de *N*-nitrosodibutylamine ont été détectées pour la viande de porc chauffée. Rien n'indique dans cette étude si les résultats ont été corrigés pour tenir compte d'une éventuelle perte d'humidité ou absorption de graisse dans la volaille et le porc rôtis. Cette étude a également révélé que la somme des *N*-NAs étudiés dans la viande de porc chauffée (13 µg/kg) et la volaille chauffée (19 µg/kg) était plus élevée que les niveaux des *N*-NAs dans divers produits à base de viande transformés (fumés) tels que la saucisse fumée (5 µg/kg), le salami (4 µg/kg), le jambon (7 µg/kg) et le bacon (6 µg/kg).

Dans une autre étude, 1 µg/kg de *N*-nitrosodiméthylamine et 1 µg/kg de *N*-nitrosodiéthylamine ont été mesurés dans de la volaille cuite (pas d'information sur les dimensions de l'échantillon traité thermiquement) (Bara *et al.*, 2011). Tricker *et al.* (1991) ont détecté des valeurs moyennes de 0,93 µg/kg de *N*-nitrosodiméthylamine, 0,25 µg/kg de *N*-nitrosopipéridine et 0,10 µg/kg de *N*-nitrosopyrrolidine dans du poulet cuit (pas d'information sur les dimensions de l'acier traité thermiquement). Les deux dernières études se réfèrent toujours au poulet « cuit ». Il n'est pas clair s'il s'agit généralement de poulet traité thermiquement ou si le poulet a effectivement été cuit dans l'eau.

Les teneurs en *N*-NA rapportées ci-dessus pour le porc et la volaille traités à la chaleur (non transformés) dans les études de Tricker *et al.* (1991), Yurchenko et Mölder (2007) et Bara *et al.* (2011) sont relativement faibles. Il convient également de noter que la teneur en nitrites du porc et de la volaille traités thermiquement n'a pas été mesurée dans ces études, de sorte que l'on ne sait pas si des nitrites ont été ajoutés à ces produits à base de viande avant le traitement thermique. Ces études

ne permettent donc pas de juger formellement quant à la formation ou non des *N*-NAs lorsque la viande est chauffée sans ajout de nitrites.

Le malondialdéhyde ou malonaldéhyde est un composé formé par la peroxydation des acides gras insaturés dans les aliments. C'est pourquoi le malondialdéhyde est un indicateur de la présence de produits d'oxydation des lipides. En présence de nitrite, le malondialdéhyde peut faciliter la formation de *N*-NA à partir de la diméthylamine, de la diéthylamine, de la pipéridine, de la pyrrolidine et de la morpholine dans des milieux presque neutres et basiques (Hartman, 1983). En revanche, le malondialdéhyde est très réactif dans l'huile. Ainsi, une simulation de la formation de malondialdéhyde au cours de l'oxydation lipidique de l'huile de tournesol a montré que, selon la durée du chauffage, les concentrations de malondialdéhyde obtenues expérimentalement peuvent sous-estimer de manière significative la progression de l'oxydation lipidique (Vandemoortele et al., 2021). Compte tenu de tous ces éléments, il n'est pas possible de déterminer avec certitude si les produits d'oxydation des lipides entraînent ou non un risque accru de formation des *N*-NAs.

### 5.2.5. Formation d'amines aromatiques hétérocycliques dans les produits frits à base de viande

Les AAHs se trouvent principalement dans la croûte des viandes et poissons grillés ou frits et, dans une moindre mesure, à l'intérieur des viandes cuites. La température de la croûte pendant la friture est beaucoup plus élevée que celle du milieu, qui ne devrait pas dépasser 80 °C pendant une cuisson normale. La teneur en AAHs de la viande cuite dépend fortement du temps et de la température de cuisson et, dans une certaine mesure, du type de viande. Les AAHs peuvent être formés à des températures de cuisson normales, par exemple 150-200 °C, et en général, une température plus élevée ou un temps de cuisson plus long augmentent la production des AAHs. Les précurseurs dans la viande et le poisson sont la créatin(in)e, le glucose, les acides aminés libres et certains dipeptides (Arvidsson *et al.*, 1997). Pendant le traitement thermique, des AAHs potentiellement mutagènes et cancérigènes peuvent être formés par la réaction de Maillard (Gibis, 2016).

Les AAHs sont divisés en deux groupes : les AAHs thermiques, qui se forment à des températures comprises entre 100 °C et 300 °C, et les AAHs pyrolytiques, qui se forment à des températures supérieures à 300 °C. Les AAHs thermiques sont présents dans presque tous les aliments chauffés d'origine animale, comme la viande et le poisson. En effet, la créatin(in)e, précurseur nécessaire à leur formation, est présente dans ces produits. Depuis 1977, plus de 25 AAHs mutagènes ont été isolées et identifiées. Les AAHs les plus couramment trouvées dans la viande sont toutes des AAHs thermiques. Ces AAHs thermiques sont la 2-amino-1-méthyl-6-phénylimidazo[4,5-b]pyridine (PhIP), la 2-amino-3,8-diméthylimidazo[4,5-f]quinoxaline (MeIQ), la 2-amino-3,4,8-triméthylimidazo[4,5-f]quinoxaline (4,8-DiMeIQx), 2-amino-3-méthylimidazo[4,5-f]quinoline (IQ), 2-amino-3,4-diméthylimidazo[4,5-f]quinoline (MeIQ) et 2-amino-9H-pyrido[2,3-b]indole (AαC) (Gibis, 2016).

Dans l'étude de Gibis et Weiss (2010) des steaks hachés de bœuf ont été grillés des deux côtés. Ainsi, avant d'être grillés, les steaks hachés de bœuf congelés ont été enduits de 5 g d'huile de tournesol raffinée par face. Les steaks hachés ont ensuite été recouverts des deux côtés d'une feuille d'aluminium et frits pendant 160 secondes à l'aide d'un gril double face chauffé à 230 °C. À la fin du processus de cuisson, les steaks hachés atteignaient une température à cœur de 72 °C et une température de surface inférieure à 190 °C. Une moyenne d'environ 0,6 µg/kg de MeIQx, 0,4 µg/kg d'AAH 9H-pyrido[3,4-b]indole (norharman), 0,9 µg/kg d'AAH 1-méthyl-9H-pyrido[3,4-b]indole (harman) et 0,05 µg/kg de PhIP a été mesurée dans les steaks hachés de bœuf.

L'étude de Liao *et al.* (2010) a examiné les niveaux des divers AAHs dans des poitrines de poulet frites dans de l'huile de soja à 180 °C pendant 10 minutes. L'IQ, le 3-amino-1,4-diméthyl-5H-pyrido[4,3-b]indole (Trp-P-1) et le 3-amino-1-méthyl-5H-pyrido[4,3-b]indole (Trp-P-2) étaient indétectables,

tandis qu'en moyenne environ 0,8 µg/kg de MeIQx, 0,4 µg/kg de 4,8-DiMeIQx, 2,2 µg/kg de PhIP, 5,4 µg/kg de norharman, 12,3 µg/kg d'harman, 0,3 µg/kg d'Aac et 0,02 µg/kg de 2-amino-3-méthyl-9Hpyrido[2,3-b]indole (MeAac) ont été mesurés. L'étude a comparé différentes méthodes de préparation thermique. La teneur totale en AAHs était plus élevée dans la poitrine de poulet frite (21,3 ng/g) que dans la poitrine de poulet rôtie (au four pendant 20 minutes à 200 °C) (4 ng AAHs/g), mais plus faible que dans le blanc de poulet grillé au charbon de bois (grillé pendant 10 minutes de chaque côté à une distance d'environ 8 cm du charbon de bois et avec une température de surface mesurée du blanc de poulet de 200 °C) (112 ng AAHs/g) et dans le blanc de poulet rôti à la poêle (rôti pendant 5 minutes de chaque côté dans une poêle revêtue de téflon avec une température de surface de 180 °C) (27, 4 ng AAHs/g). Contrairement à la friture, aucune huile n'a été utilisée dans les autres préparations de poulet mentionnées.

Zhang *et al.* (2013) ont étudié la formation des AAHs MeIQx, 4,8-DiMeIQx et PhIP dans la viande de porc frite. Les résultats ont montré que les AAHs étaient produits pendant la friture et que leurs niveaux augmentaient avec la durée et la température de la friture. Dans l'étude, des boulettes de viande de porc, des hamburgers ("*patties*") et des tranches fines (50 g de viande de porc sans additifs) ont été frits à 180 °C pendant 5 minutes (type d'huile de friture inconnu). Dans les boulettes de viande de porc frites, des valeurs moyennes de 1,0 µg/kg de MeIQx, 0,31 µg/kg de 4,8-DiMeIQx et 5,3 µg/kg de PhIP ont été mesurées. Pour les hamburgers, des valeurs moyennes de 3,2 µg/kg de MeIQx, 0,7 µg/kg de 4,8-DiMeIQx et 18,4 µg/kg de PhIP ont été mesurées. Enfin, pour les tranches fines, des valeurs moyennes de 1,0 µg/kg de MeIQx, 0,3 µg/kg de 4,8-DiMeIQx et 5,4 µg/kg de PhIP ont été mesurées. Ainsi, les niveaux les plus élevés ont été observés pour les hamburgers. Selon les auteurs, cela indique que les AAHs se forment à la surface du porc frit, et que les hamburgers ayant une plus grande surface de contact avec l'huile, plus de AAHs se sont formés. Ce résultat peut également s'expliquer par la température beaucoup plus élevée de la surface par rapport à celle de l'intérieur des hamburgers frits, étant donné que les AAHs se forment principalement à des températures élevées. Par ailleurs, les effets de déshydratation à la surface des hamburgers ont favorisé la formation des AAHs au cours du processus de friture.

### 5.2.6. Stabilité oxydative au cours du stockage des produits frits à base de viande

Les aliments frits absorbent l'huile de friture et les produits d'oxydation qui s'y trouvent. Les hydroperoxydes et autres produits d'oxydation présents dans l'huile peuvent catalyser l'oxydation des lipides. Les aliments frits sont donc très sensibles à l'oxydation pendant le transport et le stockage. Ce sont principalement les composés volatiles formés pendant le stockage qui provoquent des anomalies de goût et des odeurs réduisant la durée de conservation des aliments frits. Une évaluation précise de l'oxydation des lipides dans les aliments frits peut permettre aux transformateurs de produits alimentaires de déterminer si les changements de formulation, les changements d'huile ou l'ajout d'antioxydants ont un effet significatif sur la durée de conservation des aliments frits (Hwang, 2016). Cependant, il n'existe pas de méthode standard pour mesurer la stabilité oxydative pendant la conservation des produits frits à base de viande. L'une des méthodes possibles est la détermination de l'indice de peroxyde (Shahidi, 2016).

### 5.2.7. Évaluation de l'examen de la littérature : implications pour le processus de friture de l'opérateur

Six risques potentiels pour la santé publique ont été identifiés en fonction du processus de friture de l'opérateur. Les sections précédentes traitent des publications scientifiques retrouvées sur ces dangers (voir sections 5.2.1-5.2.6). Dans cette partie, le risque pour la santé publique de chacun des dangers identifiés est évalué sur la base de ces publications. Ceci est également lié à l'évaluation susmentionnée des paramètres de l'huile de tournesol mesurés par l'opérateur par rapport aux

exigences légales (voir section 5.1.4). Enfin, la nécessité d'une analyse plus approfondie de certains dangers est déterminée.

#### Évaluation du danger : appréciation basée sur les données de la littérature et les résultats de l'analyse de l'opérateur

##### *Huile de friture*

La stabilité thermo-oxydative des huiles végétales est en corrélation négative avec la quantité d'acides gras polyinsaturés qu'elles contiennent. L'huile de tournesol standard utilisée par l'opérateur contient des niveaux relativement élevés d'acides gras polyinsaturés et est donc moins adaptée aux applications à haute température telles que la friture. Pour la friture, il est recommandé d'utiliser une huile ayant une teneur plus faible en acides gras polyinsaturés et une teneur plus élevée en acides gras monoinsaturés. Les variétés à forte teneur en acide oléique de l'huile de tournesol et de l'huile de maïs, entre autres, en sont des exemples.

Les résultats d'analyse relatives à l'huile de tournesol obtenues de l'opérateur consistent en des données relatives aux acides gras libres, aux triglycérides dimériques et polymériques, aux substances polaires et à l'indice de peroxyde. Toutefois, ces données montrent que les quantités déterminées de ces paramètres se situent dans les limites autorisées (voir section 5.1.4). Bien qu'une huile à forte teneur en acide oléique soit plus appropriée pour la friture, les résultats d'analyse indiquent que l'opérateur contrôle son processus de friture (dans lequel une huile de tournesol standard est utilisée).

Le danger identifié de la formation de HAPs dans l'huile de tournesol a ensuite été abordé dans l'examen de la littérature. Les études citées ont étudié la formation de HAPs dans l'huile de tournesol généralement dans des conditions plus drastiques (température de l'huile plus élevée et/ou temps de friture plus long) que celles appliquées par l'opérateur. Bien qu'un certain nombre d'études aient suggéré que des HAPs se forment dans l'huile de tournesol lors de la friture à des températures avoisinant les 180 °C, le Comité scientifique conclut que ces études ne permettent pas de tirer des conclusions avec certitude (en raison des incertitudes liées à la conception expérimentale, aux matériaux de départ et aux résultats de ces études). Sur cette base, il est estimé que la formation des HAPs dans l'huile de tournesol au cours du processus de friture de l'opérateur est peu probable.

##### *Produits à base de viande*

Dans la littérature disponible sur la formation de HAPs pendant le chauffage des produits à base de viande, la formation de HAP pendant la friture n'est pas mentionnée. Des concentrations élevées de HAP sont principalement associées aux viandes grasses et aux produits à base de viande chauffés dans des conditions prolongées et/ou extrêmes, dont les produits à base de viande préparée au barbecue ou fumée sont des exemples. Pour ces raisons, la formation de HAPs dans les boulettes de viande au cours du processus de friture de l'opérateur est considérée comme présentant un faible risque.

Le danger potentiel de formation de *N*-NAs dans les produits frits à base de viande a ensuite été examiné. Les *N*-NAs sont formés par une réaction entre le nitrite et certaines amines secondaires et tertiaires. Pour les boulettes de viande de l'opérateur, il n'y a pas d'indication d'ajout de nitrites. Sur la base de cette observation, le risque de formation des *N*-NAs pendant la friture peut être considéré comme faible. En outre, il a été examiné si le *N*-NAs pouvait néanmoins se former lors du chauffage de la viande sans ajout de nitrite. Toutefois, les données de la littérature disponible ne permettent pas de conclure que le *N*-NAs peut ou non se former lors du chauffage de la viande sans ajout de nitrites. Dans l'ensemble, il est néanmoins possible d'affirmer que le risque de formation de *N*-NAs au cours du processus de friture de produits à base de viande utilisé par l'opérateur est faible. Comme indiqué précédemment, les dépassements de la température maximale légale de l'huile au cours du processus de friture de l'opérateur sont ponctuels. Si des *N*-NAs se sont déjà formés dans les boulettes de viande



au cours du processus de friture de l'opérateur, on s'attend à ce que, lors de ces dépassements ponctuels, la formation supplémentaire des N-NAs soit limitée et ne présente pas de risque.

Plusieurs publications relatives à des études sur la formation d'AAHs pendant le chauffage de produits à base de viande indiquent la formation de ces composés dans les produits à base de viande à des conditions de température et de temps de chauffage similaires à celles du processus de friture de l'opérateur. Sur la base des données de la littérature disponible, le Comité scientifique est d'avis que la formation d'AAHs dans les produits frits à base de viande est un risque pertinent.

L'analyse de la littérature montre que les aliments frits sont très sensibles à l'oxydation pendant le transport et le stockage. La mesure de l'indice de peroxyde est l'une des méthodes possibles pour déterminer la stabilité oxydative pendant la conservation des produits à base de viande frits. C'est également la méthode utilisée par l'opérateur pour déterminer la stabilité oxydative pendant la conservation. Toutefois, cette approche n'est pas optimale car l'indice de peroxyde est déterminé sur la graisse extraite (voir section 5.1.4), qui peut s'oxyder pendant l'extraction. Une proposition consiste à contrôler la stabilité oxydative en mesurant les composés volatils.

Enfin, les résultats de la détermination de l'absorption d'huile des boulettes de viande que l'opérateur a frites selon son procédé sont soulignés. Pour certaines boulettes, dans l'ensemble, la libération de graisse était supérieure à l'absorption d'huile. Toutefois, en raison de l'immersion dans l'huile de tournesol à des températures élevées, un certain degré d'absorption d'huile (et donc une absorption de contaminants de processus potentiellement formés dans l'huile de tournesol) est toujours attendu au cours de la friture. Toutefois, le risque supplémentaire lié à cette absorption d'huile est faible, car l'analyse ci-dessus (basée sur les résultats de l'analyse de l'opérateur et les données de la littérature) montre qu'il n'y a qu'un faible risque de formation de contaminants de processus dans l'huile de tournesol.

#### Risque le plus pertinent et nécessité d'une analyse plus approfondie

Le Comité scientifique, sur base des données de la littérature disponibles actuellement, est d'avis que la formation d'AAHs dans les produits frits à base de viande constitue le risque le plus élevé parmi les six dangers envisagés. Pour mieux estimer le risque de formation d'AAHs dans les boulettes frites de viande dans les conditions de friture spécifiques de l'opérateur (voir section 5.1.2), le Comité scientifique a choisi d'effectuer une simulation basée sur un modèle cinétique et des paramètres cinétiques issus de la littérature.

En préambule, une brève explication de la cinétique de la formation d'AAHs peut être retrouvée ci-après. Cette cinétique a été étudiée dans la littérature en utilisant des modèles préparés avec des précurseurs, tels que la créatin(in)e, le glucose, les dipeptides et les acides aminés libres, par analogie avec les niveaux dans la viande de bœuf. D'autre part, la cinétique a été étudiée en utilisant des jus de bœuf obtenus à partir de bœuf rôti comme systèmes modèles. Ces études ont montré que les AAHs sont stables à température ambiante, mais qu'ils sont sujets à une dégradation à des températures plus élevées. Ainsi, on a constaté que la dégradation se produisait à 100 °C dans des solutions d'AAHs standard et qu'elle augmentait de manière significative à des températures comprises entre 200 et 225 °C. La dégradation d'AAHs dans les systèmes de jus de viande ou dans la viande est différente car la formation peut varier davantage en raison de plusieurs paramètres, tels que le transfert de chaleur, le transfert de masse, l'évaporation de l'eau et la formation de croûtes (Gibis, 2016).

Pour la simulation de la formation d'AAHs, le Comité scientifique a choisi les paramètres cinétiques de l'étude d'Arvidsson *et al.* (1997), une étude qui a examiné la cinétique de formation d'AAHs polaires dans un système modèle à base de viande de bœuf.

En outre, le Comité scientifique a fait des choix concernant le type de boulettes de viande et les conditions spécifiques de température et de temps auxquelles la simulation a été appliquée.

La boulette de viande petit format (GB3-GB5) fabriquée par l'opérateur a été choisie pour réaliser la simulation de la formation d'AAHs pendant la friture. En effet, dans le processus de friture de l'opérateur, la formation d'AAHs est plus critique pour les boulettes de 9 g (2,5 cm de diamètre) que pour les boulettes plus grosses de 100 g (5,5 cm de diamètre) ou 150 g (7,5 cm de diamètre). Cela s'explique par le rapport surface/volume plus important des petites boulettes. En effet, la formation des composés à la surface sera relativement plus prononcée dans les petites boulettes que dans les grandes.

Deux conditions de température et de temps ont été choisies pour la simulation : 2 minutes à 182 °C et 2 minutes à 187 °C. Il convient de noter que ces conditions de température et de temps sont fictives et ne représentent en aucun cas la réalité de l'opérateur. Les conditions de température et de temps retenues pour cette simulation ont été choisies pour évaluer la sécurité du processus de friture et la pertinence des mesures correctives. En effet, la température fictive de référence de 182 °C correspond à la tolérance admise par l'AFSCA. La température fictive de 187 °C a été délibérément choisie comme un dépassement de 1 °C de la température (186 °C) à partir de laquelle l'opérateur bloque la production des boulettes frites à base de viande et détruit ensuite les boulettes. Il s'agit donc d'un scénario *worst case*. La durée de friture de 2 minutes a été choisie parce qu'il s'agit d'une durée limitée plus longue que la durée de friture réelle appliquée par l'opérateur aux petites boulettes de viande (1 minute et 50 secondes).

La simulation basée sur le danger le plus pertinent (formation d'AAHs) avait pour objectif d'estimer l'impact d'une augmentation de température de 5 °C sur la sécurité alimentaire des boulettes frites de viande. La simulation est examinée plus en détail dans ce qui suit.

### **5.3. Simulation de la formation d'amines aromatiques hétérocycliques lors de la friture d'une boulette de viande de 9 g dans de l'huile de tournesol pendant deux minutes à des températures de 182 °C et 187 °C**

Le Comité scientifique souligne qu'aucune donnée expérimentale n'est disponible sur la formation d'AAHs pendant la friture d'une boulette de viande de 9 g dans de l'huile de tournesol pendant deux minutes à 182°C et 187°C. Le modèle cinétique d'Arvidsson *et al.* (1997) a été choisi pour obtenir des paramètres cinétiques approximatifs pour ces deux conditions de température et de temps. Ces paramètres cinétiques fictifs ont ensuite été appliqués pour estimer la formation d'AAHs dans le type de boulettes de viande susmentionné. Le Comité scientifique est conscient que les niveaux simulés d'AAHs peuvent différer des valeurs réelles. Il convient de noter que le but de la simulation est d'estimer l'effet d'une augmentation de température de 5°C sur la formation de d'AAHs dans les boulettes frites de viande. De cette manière, il est estimé si une augmentation de la température de friture entraîne un risque accru pour la santé publique. Par conséquent, dans ce cas, l'écart entre les niveaux simulés et la réalité est moins important car deux conditions (2 minutes à 182 °C et 2 minutes à 187 °C) sont comparées (approche relative).

En appliquant le modèle cinétique d'Arvidsson *et al.* (1997) (voir détails en **Annexe 1**), des concentrations de IQx, MeIQx, 7,8-DiMeIQx, 4,8-DiMeIQx et PhIP de 1,0, 6,2, 0,19, 0,12 et 0,49 µg/kg de boulette de viande (ppb) respectivement, ont été estimées pour une friture de 2 minutes à 182 °C. Pour la boulette de viande frite pendant 2 minutes à 187 °C, des concentrations de 1,2, 7,7, 0,23, 0,19 et 0,58 µg/kg de boulette de viande (ppb) ont été estimées, respectivement. La simulation est décrite en détail à l'**Annexe 1**.

Par rapport à l'étude susmentionnée de Zhang *et al.* (2013) dans laquelle des niveaux déterminés expérimentalement de 1,0 µg/kg de MeIQx, 0,3 µg/kg de 4,8-DiMeIQx et 5,3 µg/kg de PhIP dans des boulettes frites de viande de porc ont été rapportés, les valeurs estimées de cet exemple sont plus élevées pour MeIQx (facteur 6), plus faibles pour 4,8-DiMeIQx (facteur 2,5) et plus faibles pour PhIP (facteur 11).

En outre, les valeurs calculées des AAHs formées peuvent être mises en perspective par rapport à l'étude de Sinha *et al.* (1998). Dans cette étude, les AAHs ont été mesurées dans divers produits de porc chauffés selon différentes techniques et à différents niveaux de cuisson de la viande. Les niveaux les plus élevés de PhIP (30 µg/kg de viande) et de MeIQx (4 µg/kg de viande) ont été trouvés dans du bacon très bien cuit préparé au four. Lors de la préparation au four, le bacon a été placé à une distance de 12 cm d'une surface chauffée à 175 °C pendant 7,2 minutes (et inversé à environ 3 et 5 minutes). Cette teneur en MeIQx déterminée par Sinha *et al.* (1998) est du même ordre de grandeur que la valeur déterminée dans la présente simulation. En revanche, la teneur en PhIP déterminée dans cette étude est d'un facteur de 50 à 60 plus élevé que dans la simulation. Sinha *et al.* (1998) ont mesuré une concentration de MeIQx environ trois fois plus élevée dans la viande très bien cuite que dans la viande bien cuite pour certaines méthodes de chauffage de différents produits à base de porc. Cette différence est beaucoup plus élevée que l'augmentation de la formation de MeIQx entre les traitements de 2 minutes à 182 °C et à 187 °C dans cette simulation.

La comparaison des niveaux de HAA détermnés expérimentalement dans les études de Sinha *et al.* (1998) et de Zhang *et al.* (2013) avec les niveaux de HAA estimés avec la présente simulation montre que les résultats de la simulation de MeIQx et de 4,8-DiMeIQx sont du même ordre de grandeur et donc fiables. Toutefois, le PhIP a été estimé beaucoup plus bas dans la simulation, ce qui peut indiquer une sous-estimation de ce composé. Pour l'analyse de risque actuelle, il est donc conseillé de corriger cela. Pour cette correction, il a été choisi de multiplier par un facteur de 11 (comparaison avec la valeur mesurée pour les boulettes frites de viande dans Zhang *et al.* (2013)). Pour la présente simulation, cela signifie que les niveaux corrigés de PhIP sont de 5,4 µg/kg de boulettes et de 6,4 µg/kg de boulettes, pour les traitements de 2 minutes à 182 °C et 187 °C, respectivement. Il s'agit encore d'une augmentation limitée de la teneur en PhIP lorsque les traitements de 2 minutes à 187 °C sont comparés aux traitements de 2 minutes à 182 °C.

Helmus *et al.* (2013) ont réalisé une étude épidémiologique sur l'association possible entre l'ingestion de AAHs dans la viande rouge et blanche et le cancer colorectal. Une association positive significative a été trouvée entre le niveau de MeIQx, DiMeIQx et PhIP, dérivé de la viande rouge, et l'incidence du cancer colorectal dans la population considérée. Aucune relation de ce type n'a été observée pour la viande blanche. À cet égard, les auteurs ont conclu que les AAHs dérivés de la viande rouge représentent une voie importante pour la cancérogénèse du cancer du côlon liée à l'environnement. Proportionnellement, une augmentation significative de l'incidence du cancer du côlon a été observée pour le troisième ((Di)MeIQx) ou le quatrième (PhIP) quartile d'exposition dans cette étude, en fonction de l'AAH considéré. L'exposition moyenne à l'AAH considéré dérivé de la viande rouge était de  $72,2 \pm 162,3$  ng MeIQx/jour,  $93,3 \pm 192,5$  ng PhIP/jour et  $4,1 \pm 7,8$  ng DiMeIQx/jour. La consommation moyenne de viande rouge était de  $50,4 \pm 64,8$  g/jour et celle de viande blanche de  $27,4 \pm 31,7$  g/jour.

Étant donné que les simulations montrent que l'augmentation de la concentration des AAHs dans les produits reste limitée, il ne semble pas probable qu'une augmentation significative du risque de cancer colorectal se produise après la consommation des boulettes frites de viande pendant 2 minutes à 187°C. Il convient également de noter que toutes les boulettes de viande ne sont pas composées de viande rouge.

Thomson (1999) a établi un lien entre le risque de cancer le plus élevé et l'ingestion des AAHs provenant de poulet préparé (rapport de cotes de  $19,1 \times 10^{-6}$ ), suivi par l'ingestion de bœuf préparé (rapport de cotes de  $12,6 \times 10^{-6}$ ), en notant que la concentration estimée de AAHs dans le poulet préparé était 6,3 fois plus élevée. Les estimations d'ingestion dans cette étude ont été réalisées de manière déterministe. Kobayashi *et al.* (2009) ont étudié l'impact de l'apport alimentaire en AAHs sur le risque de cancer du côlon dans le cadre d'une étude cas-témoins réalisée en milieu hospitalier. Au total, 117 cas de cancer du côlon et 238 témoins (sans cancer du côlon) ont été pris en compte. Pour les cas de cancer du côlon, des apports moyens en PhIP et MeIQx de 38 ng/jour et 9 ng/jour ont été déterminés, respectivement, tandis que pour les témoins, des apports moyens en PhIP et MeIQx de 43 ng/jour et 10 ng/jour ont été déterminés. Contrairement à Helmus *et al.* (2013), l'étude de Kobayashi *et al.* (2009) a conclu qu'aucune association n'a été trouvée entre l'apport alimentaire en AAHs et le cancer du côlon. Cependant, l'étude de Kobayashi *et al.* (2009) n'a pas fait de distinction entre la consommation de viande rouge et de viande blanche.

Seule l'étude de Helmus *et al.* (2013) a permis d'établir un lien quantitatif significatif entre la consommation des AAHs et le risque de cancer du côlon, mais il est apparu clairement que ce lien n'était significatif que pour les percentiles d'exposition les plus élevés et dans le cas où les AAHs provenaient de la viande rouge. La quantité estimée des AAHs formée n'a augmenté que légèrement lorsque l'on compare les traitements de 2 minutes à 187°C par rapport à 182°C. Il est peu probable que l'augmentation limitée de l'exposition entraîne un risque significativement accru de cancer du côlon.

## 6. Incertitudes

Le suivi correct du processus de friture nécessite un contrôle précis de la température et, par conséquent, un étalonnage régulier du thermostat de la friteuse électrique. Cependant, les documents fournis ne contiennent aucune information sur l'étalonnage du thermostat.

Les analyses effectuées par l'opérateur sur l'huile de tournesol se limitent à la détermination des acides gras libres, des triglycérides dimériques et polymériques, des substances polaires sur la graisse et de l'indice de peroxyde. Les analyses pertinentes effectuées par l'opérateur sur les boulettes de viande se limitent à la détermination de l'absorption de l'huile et de l'indice de peroxyde. La détermination de l'indice de peroxyde présente des incertitudes et des limitations méthodologiques.

Les analyses effectuées donnent une indication de la stabilité oxydative, et l'on suppose donc qu'elles peuvent être utilisées pour garantir la sécurité du processus. Néanmoins, on peut indiquer qu'il existe une grande incertitude à propos du degré de formation de contaminants de processus dans l'huile de tournesol ou les boulettes frites de viande. Les données bibliographiques disponibles sur les risques associés à la friture de produits à base de viande dans de l'huile de tournesol sont plutôt rares. Sur la base de ces données, une estimation théorique des risques possibles a été réalisée. Cette estimation repose en partie sur des opinions d'experts.

Dans la simulation de la formation d'AAHs pendant la friture d'une boulette de viande, les paramètres cinétiques n'ont pas été déterminés expérimentalement mais sont issus de la littérature (Arvidsson *et al.*, 1997) où ils ont été déterminés par un système modèle. La comparaison avec la littérature montre que les niveaux estimés de PhIP par simulation sont probablement sous-estimés. L'analyse des risques a corrigé ceci en multipliant les niveaux estimés de PhIP par un facteur déterminé à partir des données de la littérature.

Les données de consommation de boulettes de viande frites (provenant d'enquêtes sur la consommation alimentaire) ne sont pas disponibles. Toutefois, la consommation de boulettes de

viande frites ne devrait pas contribuer de manière excessive à l'apport en HAA. En outre, l'incertitude concernant les données de consommation ne modifie pas les conclusions du présent avis. En effet, la littérature montre qu'un risque accru de cancer (du côlon) n'est significatif que pour les percentiles d'exposition les plus élevés dans le cas du HAA dérivé de la viande rouge.

## 7. Conclusions

Le Comité scientifique n'a pas d'objection à ce que l'AFSCA réponde favorablement à la demande de dérogation de l'opérateur pour la friture de boulettes de viande dans de l'huile de tournesol à une température supérieure à 180 °C mais limitée à 186 °C. Des mesures correctives doivent toutefois être appliquées à partir du dépassement de 183 °C (température d'action choisie par l'opérateur). Les mesures correctives consistent en la destruction des boulettes frites de viande et au changement immédiat de l'huile de friture. Cela est nécessaire si (i) la température de l'huile dépasse 183 °C pendant six minutes et que ce dépassement s'accompagne d'une teneur en matières polaires dépassant 25% (norme légale conformément à l'arrêté royal du 22 janvier 1988) ou si (ii) la température de l'huile dépasse 186 °C. Il convient de noter que la tolérance de température de l'huile autorisée par l'AFSCA est de 182 °C. Cependant, le processus de friture de l'opérateur (friteuse électrique et processus par lots) est intrinsèquement sensible aux fluctuations de température. Grâce aux données d'enregistrement de la température sur une période plus longue (avec seulement quelques dépassements de 182 °C), le Comité scientifique peut affirmer qu'il est acceptable que les mesures correctives décrites ci-dessus ne soient prises qu'à partir d'une température de 183 °C.

L'avis du Comité scientifique est notamment motivé par le fait que les données analytiques de l'huile de friture (des acides gras libres, des triglycérides dimériques et polymériques, des substances polaires sur la graisse et l'indice de peroxyde) sont conformes aux normes légales. Cela montre que l'opérateur contrôle son processus.

En outre, sur la base des opinions d'experts et de l'étude de la littérature, six risques ont été pris en compte :

- 1) oxydation de l'huile de tournesol ;
- 2) formation d'HAPs dans l'huile de tournesol ;
- 3) formation d'HAPs dans les produits frits à base de viande ;
- 4) stabilité oxydative pendant la conservation des produits frits à base de viande ;
- 5) formation de *N*-NAs dans les produits frits à base de viande ; et
- 6) formation d'AAHs dans les produits frits à base de viande.

Le Comité scientifique estime que la formation d'AAHs dans les produits frits à base de viande est le seul risque pertinent. Une simulation de la formation d'AAHs a donc été réalisée pour le produit le plus critique de l'opérateur, une boulette de viande d'un diamètre de 2,5 cm. Sur la base de paramètres cinétiques provenant de la littérature, la formation d'AAHs dans la boulette de viande a été simulée pour l'application d'un procédé de friture de deux minutes à 182 °C (tolérance maximale de l'AFSCA) d'une part et à 187 °C (1 °C de plus que la température à laquelle l'opérateur détruit immédiatement les boulettes de viande) d'autre part. La simulation permet de conclure que l'augmentation de la formation d'AAHs à 187 °C par rapport à 182 °C est très limitée. Sur la base de ces efforts, le Comité scientifique est d'avis qu'il n'y a pas de risque associé à la consommation des boulettes frites de viande fabriquées par cet opérateur lorsque des dépassements ponctuels de la température maximale de l'huile de 180 °C se produisent au cours du processus de friture, à condition que les mesures correctives de l'opérateur soient appliquées de manière cohérente.

## 8. Recommandations

Le Comité scientifique recommande de calibrer régulièrement le thermostat de la friteuse électrique.

Plutôt que de déterminer les acides gras libres, le Comité scientifique recommande de mesurer la fraction polaire comme contrôle de routine sur l'huile de tournesol. En effet, la fraction polaire prend en compte plus de produits de dégradation que les seuls acides gras libres et constitue donc une méthode plus précise pour déterminer l'état de dégradation de l'huile de friture.

En outre, le Comité scientifique recommande d'utiliser une huile ayant une teneur plus faible en acides gras polyinsaturés et une teneur plus élevée en acides gras monoinsaturés que l'huile de tournesol utilisée actuellement par l'opérateur, car la première présentera une meilleure stabilité à l'oxydation.

Pour le Comité scientifique,  
La Présidente,

Dr. Lieve Herman (Sé.)  
Le 27/06/2023

## Références

- An, K.-J., Liu, Y.-L., & Liu, H.-L. (2017). Relationship between total polar components and polycyclic aromatic hydrocarbons in fried edible oil. *Food Additives & Contaminants: Part A* 34(9), 1596-1605. <https://doi.org/10.1080/19440049.2017.1338835>
- Arvidsson, P., Van Boekel, M. A. J. S., Skog, K., & Jägerstad, M. (1997). Kinetics of formation of polar heterocyclic amines in a meat model system. *Journal of Food Science* 62(5), 911-916. <https://doi.org/10.1111/j.1365-2621.1997.tb15005.x>
- Bara, V., Bara, C., & Bara, L. (2011). Nitrosamines occurrence in some food products. *Oradea (Romania): Analele Universitatii din Oradea, Fascicula: Exotologie, Zootehnie si Tehnologii de Industrie Alimentara*, 27–34.
- Ben Hammouda, I., Márquez-Ruiz, G., Holgado, F., Freitas, F., Gomes Da Silva, M. D. R., & Bouaziz, M. (2019). Comparative study of polymers and total polar compounds as indicators of refined oil degradation during frying. *European Food Research and Technology* 245, 967-976. <https://doi.org/10.1007/s00217-018-3202-5>
- Chiang, V. S.-C., & Quek, S.-Y. (2017). The relationship of red meat with cancer: Effects of thermal processing and related physiological mechanisms. *Critical Reviews in Food Science and Nutrition* 57(6), 1153-1173. <https://doi.org/10.1080/10408398.2014.967833>
- Choe, E., & Min, D. B. (2007). Chemistry of Deep-Fat Frying Oils. *Journal of Food Science* 72(5), R77-R86. <https://doi.org/10.1111/j.1750-3841.2007.00352.x>
- Codex Alimentarius (1999). Codex standard for named vegetable oils (CODEX-STAN 210 – 1999).
- Conseil Supérieur de la Santé (2011). Publication n° 8310. Sécurité des huiles et graisses, 1-63.
- EFSA (2008). Scientific Opinion of the Panel on Contaminants in the Food Chain on a request from the European Commission on Polycyclic Aromatic Hydrocarbons in Food. *The EFSA Journal* 724, 1-114. <https://doi.org/10.2903/j.efsa.2008.724>
- EFSA (2023). Scientific opinion: Risk assessment of N-nitrosamines in food. *EFSA Journal* 21(3), 1–278. <https://doi.org/10.2903/j.efsa.2023.7884>
- FAVV (2021). Module préparations frites. Module FR G-044 version 2 d.d. 12/01/2021. [https://www.favv-afscab.be/autocontrole-fr/guides/distribution/generique/\\_documents/2021-01-12G-044\\_modulepreparationsfrites\\_v2.pdf](https://www.favv-afscab.be/autocontrole-fr/guides/distribution/generique/_documents/2021-01-12G-044_modulepreparationsfrites_v2.pdf)
- Garcés, R., Martínez-Force, E., Salas, J. J., & Venegas-Calderón, M. (2009). Current advances in sunflower oil and its applications. *Lipid Technology* 21(4), 79-82. <https://doi.org/10.1002/lite.200900016>
- Garcia Rojas, E. E., Coimbra, J. S. R., & Telis-Romero, J. (2013). Thermophysical properties of cotton, canola, sunflower, and soybean oils as a function of temperature. *International Journal of Food Properties* 16, 1620-1629. <https://doi.org/10.1080/10942912.2011.604889>
- Gibis, M. (2016). Heterocyclic Aromatic Amines in Cooked Meat Products: Causes, Formation, Occurrence, and Risk Assessment. *Comprehensive Reviews in Food Science and Food Safety* 15, 269-302. <https://doi.org/10.1111/1541-4337.12186>

- Gibis, M., & Weiss, J. (2010). Inhibitory effect of marinades with hibiscus extract on formation of heterocyclic aromatic amines and sensory quality of fried beef patties. *Meat Science* 85, 735-742. <https://doi.org/10.1016/j.meatsci.2010.03.034>
- Harris, R. C., Lowe, J. A., Warnes, K., & Orme, C. E. (1997). The concentration of creatine in meat, offal and commercial dog food. *Research in Veterinary Science* 62, 58-62. [https://doi.org/10.1016/S0034-5288\(97\)90181-8](https://doi.org/10.1016/S0034-5288(97)90181-8)
- Hartman, P. E. (1983). Review: Putative mutagens and carcinogens in foods. IV. Malonaldehyde (malondialdehyde). *Environmental Mutagenesis* 5, 603-607. <https://doi.org/10.1002/em.2860050409>
- Helmus, D. S., Thompson, C. L., Zelenskiy, S., Tucker, T. C., & Li, L. (2013). Red meat-derived heterocyclic amines increase risk of colon cancer: a population-based case-control study. *Nutrition and Cancer* 65(8), 1141-1150. <https://doi.org/10.1080/01635581.2013.834945>
- Hwang, H.-S. (2016). Oxidative Stability and Shelf Life of Frying Oils and Fried Foods, in Hu, M., & Jacobsen, C. (ed.) *Oxidative Stability and Shelf Life of Foods Containing Oils and Fats*. London: Academic Press and AOCS Press, 251-285. <https://doi.org/10.1016/b978-1-63067-056-6.00007-0>
- Howe, G. R., Harrison, L., & Jain, M. (1986). A short diet history for assessing dietary exposure to N-nitrosamines in epidemiologic studies. *American Journal of Epidemiology* 124(4), 595-602. <https://doi.org/10.1093/oxfordjournals.aje.a114432>
- Iwegbue, C. M. A., Osijaye, K. O., Igbuku, U. A., Egobueze, F. E., Tesi, G. O., Bassey, F. I., & Martincigh, B. S. (2020). Effect of the number of frying cycles on the composition, concentrations and risk of polycyclic aromatic hydrocarbons (PAHs) in vegetable oils and fried fish. *Journal of Food Composition and Analysis* 94, 103633. <https://doi.org/10.1016/j.jfca.2020.103633>
- Kobayashi, M., Otani, T., Iwasaki, M., Natsukawa, S., Shaura, K., Koizumi, Y., Kasuga, Y., Sakamoto, H., Yoshida, T., & Tsugane, S. (2009). Association between dietary heterocyclic amine levels, genetic polymorphisms of NAT2, CYP1A1, and CYP1A2 and risk of colorectal cancer: A hospital-based case-control study in Japan. *Scandinavian Journal of Gastroenterology* 44, 952-959. <https://doi.org/10.1080/00365520902964721>
- Laser Reuterswärd, A., Skog, K., & Jägerstad, M. (1987). Mutagenicity of pan-fried bovine tissues in relation to their content of creatine, creatinine, monosaccharides and free amino acids. *Food and Chemical Toxicology* 25(10), 755-762. [https://doi.org/10.1016/0278-6915\(87\)90230-4](https://doi.org/10.1016/0278-6915(87)90230-4)
- Liao, G. Z., Wang, G. Y., Xu, X. L., & Zhou, G. H. (2010). Effect of cooking methods on the formation of heterocyclic aromatic amines in chicken and duck breast. *Meat Science* 85, 149-154. <https://doi.org/10.1016/j.meatsci.2009.12.018>
- Matthäus, B., Haase, N. U., & Vosmann, K. (2004). Factors affecting the concentration of acrylamide during deep-fat frying of potatoes. *Eur. J. Lipid Sci. Technol.* 106, 793-801. <https://doi.org/10.1002/ejlt.200400992>
- Min, B., Nam, K. C., Cordray, J., & Ahn, D. U. (2008). Endogenous factors affecting oxidative stability of beef loin, pork loin, and chicken breast and thigh meats. *Journal of Food Science* 73(6), C439-C446. <https://doi.org/10.1111/j.1750-3841.2008.00805.x>
- Papastergiadis, A., Fatouh, A., Jacxsens, L., Lachat, C., Shrestha, K., Daelman, J., Kolsteren, P., Van Langenhove, H., & De Meulenaer, B. (2014). Exposure assessment of Malondialdehyde, 4-Hydroxy-2-



(E)-Nonenal and 4-Hydroxy-2-(E)-Hexenal through specific foods available in Belgium. *Food and Chemical Toxicology* 73, 51-58. <http://dx.doi.org/10.1016/j.fct.2014.06.030>

Persson, E., Sjöholm, I., & Skog, K. (2002). Heat and mass transfer in chicken breasts – effect on Phip formation. *Eur Food Res Technol* 214, 455-459. <https://doi.org/10.1007/s00217-001-0462-1>

Quiles, J. L., Huertas, J. R., Battino, M., Ramírez-Tortosa, M. C., Cassinello, M., Mataix, J., Lopez-Frias, M., & Mañas, M. (2002). The intake of fried virgin olive or sunflower oils differentially induces oxidative stress in rat liver microsomes. *British Journal of Nutrition* 88, 57-65. <https://doi.org/10.1079/BJN2002588>

Raters, M., & Matissek, R. (2014). Quantitation of polycyclic aromatic hydrocarbons (PAH4) in cocoa and chocolate samples by an HPLC-FD method. *Journal of Agricultural and Food Chemistry* 62, 10666-10671. <https://doi.org/10.1021/jf5028729>

Sakurai, H., Yoshihashi, T., Nguyen, H. T. T., & Pokorný, J. (2003). A new generation of frying oils. *Czech J. Food Sci.* 21(4), 145-151. <https://doi.org/10.17221/3491-CJFS>

Shahidi, F. (2016). Oxidative Stability and Shelf life of Meat and Meat Products, in Hu, M., & Jacobsen, C. (ed.) *Oxidative Stability and Shelf Life of Foods Containing Oils and Fats*. London: Academic Press and AOCS Press, 373-389. <https://dx.doi.org/10.1016/B978-1-63067-056-6.00010-0>

Singh, L., Varshney, J. G., & Agarwal, T. (2016). Review: Polycyclic aromatic hydrocarbons' formation and occurrence in processed food. *Food Chemistry* 199, 768-781. <https://doi.org/10.1016/j.foodchem.2015.12.074>

Sinha, R., Knize, M. G., Salmon, C. P., Brown, E. D., Rhodes, D., Felton, J. S., Levander, O. A., & Rothman, N. (1998). Heterocyclic amine content of pork products cooked by different methods and to varying degrees of doneness. *Food and Chemical Toxicology* 36, 289-297. [https://doi.org/10.1016/S0278-6915\(97\)00159-2](https://doi.org/10.1016/S0278-6915(97)00159-2)

Srivastava, S., Singh, M., George, J., Bui, K., & Shukla, Y. (2010). Genotoxic and carcinogenic risks associated with the consumption of repeatedly boiled sunflower oil. *Journal of Agricultural and Food Chemistry* 58, 11179-11186. <https://doi.org/10.1021/jf102651n>

Thomson, B. (1999). Heterocyclic amine levels in cooked meat and the implication for New Zealanders. *European Journal of Cancer Prevention* 8, 201-206. <https://doi.org/10.1097/00008469-199906000-00007>

Tricker, A. R., Pfundstein, B., Theobald, E., Preussman, R., & Spiegelhalder, B. (1991). Mean daily intake of volatile N-nitrosamines from foods and beverages in West Germany in 1989-1990. *Food Chem Toxicol* 29, 729-732. [https://doi.org/10.1016/0278-6915\(91\)90180-F](https://doi.org/10.1016/0278-6915(91)90180-F)

Vandemoortele, A., Heynderickx, P. M., Leloup, L., & De Meulenaer, B. (2021). Kinetic modeling of malondialdehyde reactivity in oil to stimulate actual malondialdehyde formation upon lipid oxidation. *Food Research International* 110063, 1-11. <https://doi.org/10.1016/j.foodres.2020.110063>

Xu, L., Yang, F., Li, X., Zhao, C., Jin, Q., Huang, J., & Wang, X. (2019). Kinetics of forming polar compounds in frying oils under frying practice of fast food restaurants. *LWT – Food Science and Technology* 115, 108307. <https://doi.org/10.1016/j.lwt.2019.108307>

Yurchenko, S., & Mölder, U. (2007). The occurrence of volatile *N*-nitrosamines in Estonian meat products. *Food Chemistry* 100, 1713-1721. <https://doi.org/10.1016/j.foodchem.2005.10.017>

Zhang, Y. Yu, C., Mei, J., & Wang, S. (2013). Formation and mitigation of heterocyclic aromatic amines in fried pork. *Food Additives & Contaminants: Part A* 30(9), 1501-1507. <https://doi.org/10.1080/19440049.2013.809627>

Zhu, Y., Li, X., Huang, J., Zhao, C., Qi, J., Jin, Q., & Wang, X. (2018). Correlations between polycyclic aromatic hydrocarbons and polar components in edible oils during deep frying of peanuts. *Food Control*, 87, 109-116. <https://doi.org/10.1016/j.foodcont.2017.12.011>

## Présentation du Comité scientifique institué auprès de l'AFSCA

Le Comité scientifique est un organe consultatif institué auprès de l'Agence fédérale belge pour la Sécurité de la Chaîne Alimentaire (AFSCA) qui rend des avis scientifiques indépendants en ce qui concerne l'évaluation et la gestion des risques dans la chaîne alimentaire, et ce sur demande de l'administrateur délégué de l'AFSCA, du ministre compétent pour la sécurité alimentaire ou de sa propre initiative. Le Comité scientifique est soutenu administrativement et scientifiquement par la Direction d'encadrement pour l'évaluation des risques de l'Agence alimentaire

Le Comité scientifique est composé de 22 membres, nommés par arrêté royal sur base de leur expertise scientifique dans les domaines liés à la sécurité de la chaîne alimentaire. Lors de la préparation d'un avis, le Comité scientifique peut faire appel à des experts externes qui ne sont pas membres du Comité scientifique. Tout comme les membres du Comité scientifique, ceux-ci doivent être en mesure de travailler indépendamment et impartialement. Afin de garantir l'indépendance des avis, les conflits d'intérêts potentiels sont gérés en toute transparence.

Les avis sont basés sur une évaluation scientifique de la question. Ils expriment le point de vue du Comité scientifique qui est pris en consensus sur la base de l'évaluation des risques et des connaissances existantes sur le sujet.

Les avis du Comité scientifique peuvent contenir des **recommandations** pour la politique de contrôle de la chaîne alimentaire ou pour les parties concernées. Le suivi des recommandations pour la politique est la responsabilité des gestionnaires de risques.

Les questions relatives à un avis peuvent être adressées au secrétariat du Comité scientifique : [Secretariat.SciCom@afsca.be](mailto:Secretariat.SciCom@afsca.be).

## Membres du Comité scientifique

Le Comité scientifique est composé des membres suivants :

A. Clinquart <sup>1</sup>, P. Delahaut, B. De Meulenaer, N. De Regge, J. Dewulf, L. De Zutter, A. Geeraerd Ameryckx, N. Gillard, L. Herman, K. Houf, N. Korsak, L. Maes, M. Mori, A. Rajkovic, N. Roosens, C. Saegerman, M.-L. Scippo, P. Spanoghe, K. Van Hoorde, Y. Vandenplas, F. Verheggen, P. Veys <sup>2</sup>, S. Vlaeminck

<sup>1</sup>membre jusqu'en décembre 2021 ; <sup>2</sup>membre à partir de janvier 2022

## Conflit d'intérêts

Aucun conflit d'intérêts n'a été identifié.

## Remerciement

Le Comité scientifique remercie la Direction d'encadrement pour l'évaluation des risques et les membres du groupe de travail pour la préparation du projet d'avis, et les deux *deep readers* P. Spanoghe et C. Saegerman.

## Composition du groupe de travail

Le groupe de travail était composé des membres suivants :

Membres du Comité scientifique:	B. De Meulenaer (rapporteur), M.-L. Scippo, N. Gillard
Experts externes:	A. Richel (Gembloux Agro-Bio Tech, ULiège)
Gestionnaire de dossier:	K. Houben

Les activités du groupe de travail ont été suivies par les membres de l'administration suivant (comme observateurs) : R. Regnier et V. Vromman de l'Agence fédérale pour la Sécurité de la Chaîne alimentaire.

## Cadre juridique

Loi du 4 février 2000 relative à la création de l'Agence fédérale pour la Sécurité de la Chaîne alimentaire, notamment l'article 8 ;  
Arrêté royal du 19 mai 2000 relatif à la composition et au fonctionnement du Comité scientifique institué auprès de l'Agence fédérale pour la Sécurité de la Chaîne alimentaire ;  
Règlement d'ordre intérieur visé à l'article 3 de l'arrêté royal du 19 mai 2000 relatif à la composition et au fonctionnement du Comité scientifique institué auprès de l'Agence fédérale pour la Sécurité de la Chaîne alimentaire, approuvé par le Ministre le 24 septembre 2020.

## Disclaimer

Le Comité scientifique conserve à tout moment le droit de modifier cet avis si de nouvelles informations et données deviennent disponibles après la publication de cette version.

**Annexe 1. Simulation de la formation d'amines aromatiques hétérocycliques lors de la friture d'une boulette de viande de 9 g dans de l'huile de tournesol pendant deux minutes à des températures de 182 °C et 187 °C : contexte et calculs**

Pour la simulation fictive de la formation des AAHs à des températures d'huile de 182 °C et 187 °C, les paramètres cinétiques de l'étude d'Arvidsson *et al.* (1997) ont été utilisés. Comme système modèle de bœuf, les précurseurs créatin(in)e, glucose, acides aminés et carnosine ont été placés en solution aqueuse dans Arvidsson *et al.* (1997). À cette fin, les précurseurs ont été dissous dans l'eau dans les mêmes proportions que celles trouvées dans la viande de bœuf, mais à une concentration 20 fois plus élevée. Étant donné que l'opérateur produit une petite boulette contenant de la viande de bœuf, c'est-à-dire la petite boulette à base de poulet et de bœuf, le système modèle de viande de bœuf de l'étude d'Arvidsson *et al.* (1997) est applicable. C'est pourquoi la petite boulette de viande à base de poulet et de bœuf a été choisie pour cet exemple parmi les différentes petites boulettes de viande de l'opérateur.

La formation d'AAHs a été étudiée dans Arvidsson *et al.* (1997) entre 150 et 225 °C pendant 0,5-120 min, en fonction de la température. Les traitements thermiques ont été effectués dans un bain d'huile thermostaté. Les AAHs polaires 2-amino-3-méthylimidazo[4,5-f]quinoxaline (IQx), MeIQx, 2-amino-3,7,8-triméthylimidazo[4,5-f]quinoxaline (7,8-DiMeIQx), 4,8-DiMeIQx et PhIP ont été quantifiées. Un modèle de réaction du premier ordre et l'équation d'Eyring ont été appliqués à la formation des AAHs polaires afin d'obtenir des constantes de vitesse et leur dépendance à la température. La formation et la dégradation des AAHs ont été étudiées. Pour la présente simulation, seule la formation d'AAHs est prise en compte (approche *worst case*).

Arvidsson *et al.* (1997) ont utilisé un modèle de premier ordre pour la formation des AAHs (**Équation 1**):

$$C_t = C_0 \times (1 - e^{-k_1 t})$$

**Équation 1.** *Modèle de premier ordre pour la formation des AAHs selon Arvidsson et al. (1997), avec  $C_t$  la concentration d'une AAH en fonction du temps (nmol AAH/mmol créatin(in)e),  $C_0$  la concentration du composé à partir duquel l'AAH est formée ( $C_0$  n'est pas connu, pas même la nature du composé) (nmol AAH/mmol créatin(in)e),  $t$  le temps de chauffage (min) et  $k_1$  la constante de vitesse pour la dégradation de  $C_0$  et simultanément la constante de vitesse pour la formation de  $C_t$  ( $\text{min}^{-1}$ ). La créatin(in)e étant un précurseur important, les concentrations des AAHs ont été exprimées par rapport à celle-ci.*

Pour cette simulation fictive d'une préparation de friture en deux minutes du petit type de boulettes de viande l'opérateur à des températures de 182 °C et 187 °C, il a été choisi d'appliquer une régression linéaire simple aux valeurs  $C_0$  et  $k_1$  déterminées à différentes températures (à 150 °C, 175 °C, 200 °C et 225 °C) dans l'étude d'Arvidsson *et al.* (1997). La dégradation éventuelle des AAHs n'a pas été prise en compte (scénario *worst case*). De cette manière, les paramètres cinétiques à 182 °C et 187 °C nécessaires à cette simulation ont été estimés. Ainsi, pour IQx, MeIQx, 7,8-DiMeIQx, 4,8-DiMeIQx et PhIP, à 182 °C, des valeurs de  $C_0$  de 1,13, 8,47, 0,26, 0,48 et 1,52 nmol AAH/mmol créatin(in)e ont été estimées, et à 187 °C, des valeurs de  $C_0$  de 1,27, 8,89, 0,28, 0,49 et 1,53 nmol AAH/mmol créatin(in)e ont été estimées, respectivement. De même, les valeurs de  $k_1$  pour IQx, MeIQx, 7,8-DiMeIQx, 4,8-DiMeIQx et PhIP ont été estimées à 182 °C avec les valeurs respectives de 0,28, 0,20, 0,18, 0,05 et 0,07  $\text{min}^{-1}$ , et à 187 °C avec les valeurs respectives de 0,31, 0,24, 0,21, 0,09 et 0,09  $\text{min}^{-1}$ . L'estimation des valeurs  $C_0$  et  $k_1$  est présentée en détail dans le **Tableau 2** ci-dessous.

Pour un temps de traitement de 2 min ( $t = 2$  min), la concentration ( $C_t$ ) de chaque AAH formé a ensuite été calculée à 182 °C et 187 °C, en utilisant l'**Équation 1**. Le système modèle étant basé sur la viande de bœuf, il a été décidé de choisir la teneur en créatin(in)e de la viande de bœuf pour les calculs. Selon Laser Reuterswärd *et al.* (1987), la somme des concentrations de créatine et de créatinine dans les tissus humides de bœuf est de 33 mmol/kg. Cette concentration de créatin(in)e a été choisie pour calculer les concentrations d'AAHs en  $\mu\text{g}/\text{kg}$  de boulette de viande, ou en ppb. Le choix de cette concentration en créatin(in)e du bœuf pour la boulette poulet-bœuf est d'autant plus justifié que Harris *et al.* (1997) ont enregistré une concentration équivalente dans le blanc de poulet (33 mmol créatin(in)e/kg). Il est également important pour les calculs que la formation d'AAHs ait lieu au niveau de l'extérieur de la boulette de viande. Plus précisément, pour la boulette de viande, on estime qu'une augmentation de la concentration d'AAHs ne peut être attendue que dans et sous la croûte formée sur le bord, c'est-à-dire dans une enveloppe extérieure occupant les 3 mm extérieurs de la boulette de viande. Pour une boulette de viande de 9 g d'un diamètre de 2,5 cm, le volume d'une enveloppe extérieure (3 mm extérieurs) correspond à 2,61 cm<sup>3</sup>. Les concentrations calculées des AAHs en  $\mu\text{g}/\text{kg}$  de boulette de viande sont indiquées dans le **Tableau 3**.

**Tableau 2.** Estimation de la concentration du composé à partir duquel un AAH est formé ( $C_0$ ; nmol AAH/mmol créatin(in)e) et de la constante de vitesse  $k_1$  ( $\text{min}^{-1}$ ) pour la formation d'un AAH à des températures (T) de 182 °C et 187 °C. Une régression linéaire simple (RL) a été appliquée aux paramètres cinétiques d'Arvidsson *et al.* (1997). Les températures de 182 °C et 187 °C sont fictives et ne sont pas représentatives du processus de friture de l'opérateur.

	T (°C)	$C_0$ (nmol AAH/mmol créatin(in)e) – provenant d'Arvidsson <i>et al.</i> (1997)	ligne de régression (LR) $C_0$ en fonction de T	$R^2$	$C_0$ (nmol AAH/mmol créatin(in)e) – via RL	$k_1$ ( $\text{min}^{-1}$ ) – provenant d'Arvidsson <i>et al.</i> (1997)	LR $k_1$ en fonction de T	$R^2$	$k_1$ ( $\text{min}^{-1}$ ) – via RL	
<b>IQx</b>	150	0,261	$y = 0,0278x - 3,9275$	0,9971		0,0386	$y = 0,0056x - 0,7387$	0,6369		
	175	0,891				0,361				
	200	1,65				0,318				
	225	/				/				
	182					1,13				0,28
	187					1,27				0,31
<b>MeIQx</b>	150	6,02	$y = 0,0842x - 6,8517$	0,962		0,00721	$y = 0,0093x - 1,4952$	0,8338		
	175	7,4				0,0643				
	200	10,23				0,223				
	225	7,02				0,733				
	182					8,47				0,20
	187					8,90				0,24
<b>7,8-DiMeIQx</b>	150	0,111	$y = 0,0044x - 0,5425$	0,9028		0,0223	$y = 0,0053x - 0,7838$	0,99		
	175	0,199				0,123				
	200	0,402				0,257				
	225	0,409				0,417				
	182					0,26				0,18
	187					0,28				0,21
<b>4,8-DiMeIQx</b>	150	/	$y = 0,0025x + 0,0263$	0,7854		/	$y = 0,0065x - 1,1289$	0,9979		
	175	0,49				0,0161				
	200	0,496				0,166				
	225	0,617				0,342				
	182					0,48				0,05
	187					0,49				0,09
<b>PhIP</b>	150	1,79	$y = 0,0024x + 1,08^*$ (*observation à 150 °C non inclus)	1		0,00154	$y = 0,0029x - 0,4544$	0,8666		
	175	1,5				0,025				
	200	1,56				0,148				
	225	/				/				
	182					1,52				0,07
	187					1,53				0,09

**Tableau 3.** Estimation de la formation d'AAHs dans une boulette de viande de bœuf et de poulet de 9 g (diamètre 2,5 cm) par traitement thermique pendant 2 min ( $t = 2$  min) à la tolérance de la température maximale (182 °C) et lorsque 5 °C de cette tolérance sont dépassés (187 °C), en supposant une cinétique de premier ordre ( $C_t = C_0 \times (1 - e^{-k_1 \cdot t})$ ) et en se basant sur les paramètres cinétiques dérivés de l'étude cinétique d'Arvidsson *et al.* (1997). On suppose ici que la formation de composés ne se produit qu'au niveau de la croûte formée et juste en dessous, ce qui correspond à une enveloppe externe occupant les 3 mm extérieurs de la boulette de viande. Les préparations de friture pendant 2 minutes à des températures de 182 °C et 187 °C ne sont pas représentatives du processus de friture de l'opérateur, mais sont fictives et destinées à simuler l'augmentation des AAHs dans une approche *worst case*.

	température (°C)	concentration d'AAH en fonction du temps ( $C_t$ ) (nmol HA/mmol créatin(in)e) ( $t = 2$ min)	concentration d'AAH en nmol/kg viande <sup>a</sup>	concentration d'AAH en µg/kg viande <sup>b</sup>	poids AAH (µg) dans une boulette de viande poulet- bœuf de 9 g	poids AAH (µg) dans l'enveloppe extérieure (les 3 mm extérieurs) de viande poulet- bœuf de 9 g <sup>c</sup>	concentration d'AAH dans une boulette de viande de 9 g, exprimée en µg/kg (ppb)
<b>IQx</b>	182	0,49	16,0	3,2	0,029	0,009	1,0
	187	0,59	19,3	3,9	0,035	0,011	1,2
<b>MeIQx</b>	182	2,76	91,2	19,5	0,175	0,056	6,2
	187	3,43	113,3	24,2	0,217	0,069	7,7
<b>7,8-DiMeIQx</b>	182	0,08	2,6	0,6	0,005	0,002	0,19
	187	0,10	3,1	0,7	0,006	0,002	0,23
<b>4,8-DiMeIQx</b>	182	0,05	1,6	0,4	0,003	0,001	0,12
	187	0,08	2,6	0,6	0,005	0,002	0,19
<b>PhIP</b>	182	0,21	6,8	1,5	0,014	0,004	0,49
	187	0,25	8,1	1,82	0,016	0,005	0,58

<sup>a</sup> Valeurs obtenues en multipliant par 33 mmol de créatin(in)e/kg de tissu bovin humide (Laser Reuterswärd *et al.*, 1987).

<sup>b</sup> Obtenu en multipliant par les masses moléculaires (MM) des différents AAHs et en divisant par 1000. MM IQx = 199,21 g/mol; MM MeIQx = 213,24 g/mol; MM 7,8-DiMeIQx = 227,27 g/mol; MM 4,8-DiMeIQx = 227,27 g/mol; MM PhIP = 224,26 g/mol

<sup>c</sup> Obtenu en multipliant par le rapport entre le volume de l'enveloppe extérieure de 3 mm et le volume total de la boulette de viande de 9 g. Volume de la boulette de viande de 9 g (diamètre = 2,5 cm) = 8,18 cm<sup>3</sup>; volume de l'enveloppe extérieure de 3 mm de la boulette de viande = 2,61 cm<sup>3</sup>.