

L'analyse enthalpique différentielle (AED) est une technique précise qui permet de quantifier le niveau de dénaturation des protéines d'un échantillon de viande et donc indirectement l'intensité du traitement thermique subi par cet échantillon (Culioli, 1994; Bunton et al., 2006). La cuisson est le traitement ultime appliqué à la viande par le consommateur final ou l'industriel avant de la déguster. La maîtrise de cette opération est donc indispensable pour optimiser tout le potentiel de tendreté des morceaux de viande acquis grâce aux précautions prises en amont de la filière (sélection animale, refroidissement, maturation...).

De nombreux travaux ont utilisé l'AED pour caractériser la dénaturation des protéines au cours de la cuisson. Martens et al. (1982) ont déterminé l'évolution de la texture de différents muscles en fonction du niveau de dénaturation thermique. Ellekjaer (1991) a créé un modèle pour prédire par AED, la température maximale atteinte dans un morceau de viande pré-cuit. Kamoun et al. (1989) ont montré par AED que la sensibilité à la dénaturation thermique des viandes augmentait avec la durée de maturation de 0 à 4 jours post mortem. A partir du 4^e jour après abattage, la stabilité à la cuisson des viandes augmentait à nouveau.

Ces études ont souvent été menées à partir de cuissons modèles effectuées en bains thermostatés ou alors à basse température et sous vide.

Peu d'études ont exploité l'AED pour aborder des cuissons complexes à haute température telles que le grillage ou le rôtissage pour lesquelles les produits qui en sont issus présentent un gradient de cuisson important du cœur vers la surface. D'autre part, ces programmes ont souvent été menés à partir de prélèvements issus du centre des pièces cuites et non à partir de mélanges comprenant le cœur mais aussi la surface des pièces souvent plus dénaturée.

L'objectif du projet proposé était de profiter de la précision de l'AED et de juger de son applicabilité et de sa performance pour pouvoir contrôler en entreprise, le niveau global de pièces de viande traitées avec des techniques de cuisson induisant des hétérogénéités de température entre le cœur et la surface : grillage, rôtissage, micro-onde. Les analyses ont concerné donc des morceaux de viande entiers et non des aliquots souvent prélevés au centre du produit, point le plus froid.

L'article présente l'intérêt et les limites d'utilisation de l'AED comme outil de contrôle du niveau de cuisson des viandes en fonction des matrices carnées choisies. Un détail plus précis des résultats obtenus n'est effectué que pour un produit : le steak.

L'analyse enthalpique différentielle

Exploitation pour caractériser le niveau de cuisson global des viandes

L'analyse enthalpique différentielle (AED) est une technique précise et rapide qui permet de quantifier le taux de dénaturation protéique d'un échantillon de viande crue ou cuite. À ce titre, elle a été testée pour quantifier le niveau de cuisson global de viandes traitées à l'aide de techniques hétérogènes (grillage, rôtissage) en échantillonnant un mélange de cœur et de la surface des viandes cuites. Pour cerner les limites de la technologie, différentes conditions et paramètres de cuisson ont été expérimentés.

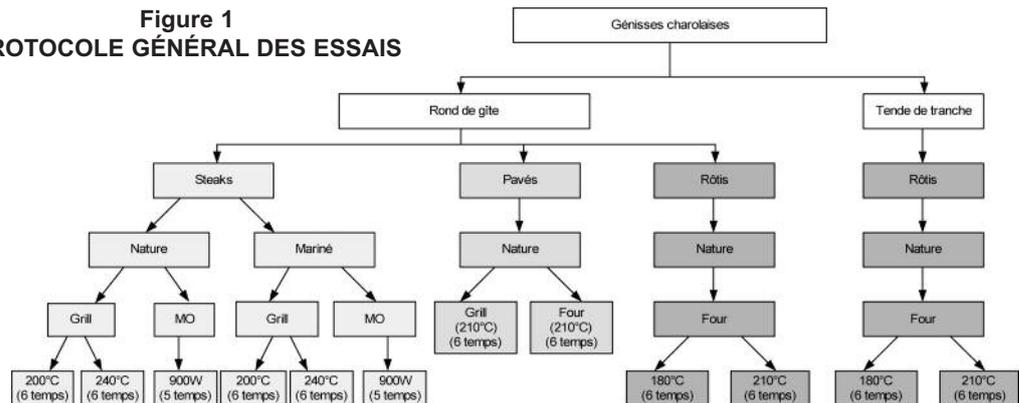
PICGIRARD L.⁽¹⁾, DJELVEH G.⁽²⁾

⁽¹⁾ Adiv, ZAC des Gravanches, 10 rue Jacqueline Auriol
63039 CLERMONT-FERRAND cedex 2

⁽²⁾ Université Blaise Pascal, Laboratoire de Génie Chimique Biochimique,
24 avenue des Landais - 63177 AUBIERE

MATÉRIELS ET MÉTHODES

Figure 1
PROTOCOLE GÉNÉRAL DES ESSAIS



Protocole général

L'objectif général des essais est d'évaluer si l'AED peut être un outil fiable d'objectivation de la cuisson pour différentes conditions de cuisson des viandes, différents types de muscles, différents formats de produits, différents traitements appliqués aux viandes.

Un maximum de variabilité a dont été induit dans les essais effectués. Ont été testés en particulier les effets :

- Muscle : rond de gîte (RG) ou tende de tranche (TT)
- Traitement du muscle avant cuisson : nature ou mariné
- Technique de cuisson :
 - * Four : 6 temps x 2 températures
 - * Grill : 6 temps x 2 températures
 - * Micro-onde : 5 temps x 1 puissance
- Format des produits :
 - * Steaks de 150 g à 1 cm d'épaisseur
 - * Pavés de 200 g à 4 cm d'épaisseur
 - * Rôtis de 660 g de dimension 7 x 7 x 12,5 cm.

Un schéma du protocole général des essais est donné en figure 1.

L'effet traitement du muscle avant cuisson par attendrissage marinage n'a été testé que sur le rond de gîte et le format steak.

L'effet muscle n'a été testé que sur le format rôti.

Tous les essais ont été conduits à partir de muscles conditionnés sous-vide provenant d'un lot homogène de génisses charolaises. Les muscles ont été réceptionnés 8 jours maximum après abattage et tranchés au plus tard le lendemain de leur réception.

Protocole détaillé

Seul le protocole détaillé appliqué aux steaks cuits au grill est présenté. Une méthodologie équivalente a été appliquée aux pavés et rôtis.

- **Traitement d'attendrissage et de marinage**
Les muscles marinés ont été attendris 2 fois sur chaque face. Ils ont été ensuite injectés avec une injecteuse Gudin au taux de 8 % avec une saumure composée de 7,4 % de NaCl, 4,7 % d'acétate et lactate de sodium, 0,4 % d'acide ascorbique et de 87,5 % d'eau. Les muscles injectés ont été barattés individuellement sous vide en baratte Inject Star® de 20 l durant 3 h 15.
Après barattage, les muscles ont été conditionnés sous vide pour être tranchés simultanément par rapport à leurs homologues non saumurés.
- **Préparation, cuisson des steaks**
Pour une température de cuisson testée au grill, deux muscles issus du même animal ont été utilisés. Le muscle gauche est resté nature, le muscle droit a été mariné selon le protocole précédent.
Chaque muscle a été raidi en cellule de surgélation 15 min à -25 °C pour être tranché en 24 tranches de 1 cm d'épaisseur à l'aide d'un trancheur à jambon.
Chaque tranche a été conditionnée individuellement sous vide pour être surgelée dans une cellule à -25 °C immédiatement après tranchage.

Les essais de cuisson ont donc été conduits sur des séries de 4 steaks, décongelés la veille de leur cuisson dans une chambre froide à +3 °C.

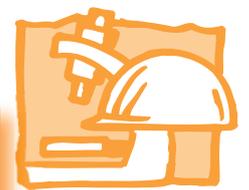
Pour éviter des perturbations des mesures d'AED par une éventuelle mais non vérifiée dénaturation des protéines, une congélation des steaks avant cuisson et une mesure de l'énergie de dénaturation protéique sur des steaks cuits frais a été préférée à une congélation de steaks cuits et une mesure AED sur des produits cuits décongelés.

Pour la cuisson au grill, un grill simple face a été utilisé. La température de surface du grill a été mesurée entre chaque cuisson. Deux températures de cuisson ont été testées : 200 °C et 240 °C. Pour chaque température de grill, 6 temps de cuisson ont été testés : 30 s par face, 1 min, 1 min 30, 2 min, 2 min 30 et 3 min par face.

Analyses effectuées

- **Analyses métrologiques et sensorielles**
Pour chaque produit, la température à cœur et son poids ont été relevés immédiatement après cuisson. Un échantillon représentatif du produit a été prélevé et le prélèvement conditionné sous vide pour être stabilisé en refroidissement rapide.
Pour les steaks cuits au grill et au four, les prélèvements étaient des cylindres de produits comprenant cœur et surface, pris au centre de la pièce. Ils étaient destinés à la mesure du niveau de dénaturation des protéines par AED. Sur la partie restante du produit cuit, la jutosité et le niveau de cuisson ont été évalués. La jutosité a été notée sur une échelle de 1 à 7 par un jury de trois experts Adiv (Note 1 : produit sec, Note 7 : produit très juteux). Le niveau de cuisson a été évalué par cinq qualificatifs : pas cuit, bleu, saignant, à point, trop cuit, par le même jury d'expert.
- **Analyses enthalpiques**
Les analyses AED ont été effectuées le lendemain de la cuisson des produits à partir d'un broyat du prélèvement sous vide.
Les analyses ont donc porté sur un mélange comprenant les zones les plus cuites (surface pour la cuisson au grill ou au four et bord pour la cuisson micro-ondes) et les zones les moins cuites c'est-à-dire le cœur des produits. Les broyats sont ensuite placés dans des creusets en inox sertis pour être introduits dans le four de calorimétrie.
Les analyses ont été conduites sur un calorimètre Mettler Toledo avec les paramètres de fonctionnement suivant :
 - poids des échantillons : 100 mg,
 - température initiale avant début de l'analyse : 40 °C avec une stabilisation de 3 min avant la montée en température,
 - montée en température avec une cinétique de 1 °C/min jusqu'à atteindre 80 °C,
 - médium utilisé pour la calorimétrie différentielle = air,
 - durée de l'analyse : 1 h.

L'objectif de l'étude étant de caractériser le niveau de cuisson global de viandes, l'énergie de dénaturation de chacune des trois familles de protéines principales de la viande a peu été utilisée. L'énergie totale de dénaturation, c'est-à-dire l'énergie nécessaire pour dénaturer toutes les protéines encore natives a principalement été utilisée.



ÉVALUATION DE L'AED COMME OUTIL D'OBJECTIVATION DE LA CUISSON

Seuls les résultats obtenus sur les steaks cuits au grill sont présentés. Les résultats obtenus sur les autres modalités sont discutés de manière globale dans la conclusion de l'étude.

Impact du process sur l'énergie de dénaturation

Plus l'intensité du traitement thermique est importante (durée de cuisson ou température de cuisson), plus les protéines de la viande sont dénaturées ce qui se traduit par une diminution de l'énergie nécessaire à la dénaturation des protéines de viande encore natives (figure 2). Le marinage et le temps de cuisson ont une influence très significative sur l'énergie de dénaturation ($p < 0,1 \%$). Au contraire, la température de cuisson n'a aucune influence (cf. figure 2).

Le marinage comme le temps de cuisson contribuent ainsi à accentuer la dénaturation des protéines natives de la viande. Ainsi, en moyenne, les produits marinés nécessitent une énergie de dénaturation de $0,163 \text{ J/g} \pm 0,16$ avant cuisson alors que les produits naturels $0,31 \text{ J/g} \pm 0,25$.

Cette dénaturation plus importante des produits marinés semble liée à l'incorporation de sel et de conservateurs dans la viande qui touchent les protéines de manière plus importante. Malgré cette dénaturation plus importante des steaks marinés, les rendements de cuisson ne sont pas affectés.

Prédiction de la jutosité

La jutosité est mieux reliée au rendement qu'à l'énergie de dénaturation mesurée par AED. Ainsi, la corrélation de la jutosité au rendement vaut $R^2 = 0,81$ alors que celle de la jutosité au logarithme népérien de l'énergie de dénaturation ne vaut que $R^2 = 0,43$.

Relation de la mesure AED au temps de cuisson

A contrario, l'AED est reliée aux temps de cuisson de manière très satisfaisante pour des températures de cuisson comprises entre $200 \text{ }^\circ\text{C}$ et $240 \text{ }^\circ\text{C}$, sans effet significatif de cette température sur la valeur d'énergie de dénaturation.

Ainsi, pour les steaks nature et marinés, la relation des temps de cuis-

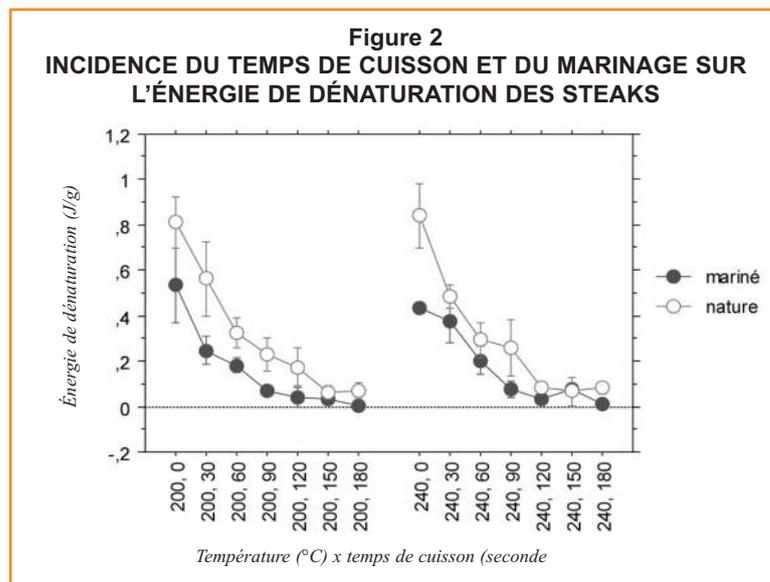


Tableau 1
**DISTINCTION DES NIVEAUX DE CUISSON DE STEAKS CUITS
AU GRILL PAR LA MESURE DE L'ÉNERGIE
DE DÉNATURATION TOTALE (J/g)**

Énergie de dénaturation (J/g)	Steaks nature	Steaks marinés
Cru	0,825 0,106 (a) ¹	0,502 0,129 (a)
Bleu	0,518 0,111 (b)	0,276 0,092 (b)
Saignant	0,277 0,084 (c)	0,104 0,051 (c)
À point	0,082 0,041 (d)	0,051 0,036 (cd)
Trop cuit	0,085 0,024 (d)	0,021 0,029 (d)
Effet niveau cuisson²	***	***
Effet température de cuisson²	NS	*

¹Résultat du test de comparaison des moyennes plsd de Fischer : deux lettres différentes sont synonymes d'une différence significative au seuil de 5 %.
²Résultat de l'analyse de variance : NS = effet non significatif; * = effet significatif au seuil de 5 %; ** = effet significatif au seuil de 1 %; *** = effet significatif au seuil de 0,1 %.

son avec l'énergie de dénaturation est la suivante :

- temps de cuisson (min) = $0,019 - 0,925 \times \ln(\text{énergie})$, pour les steaks nature
 $R^2 = 0,821$ ($p < 0,1 \%$);
- temps de cuisson (min) = $0,017 - 0,592 \times \ln(\text{énergie})$, pour les steaks marinés
 $R^2 = 0,805$ ($p < 0,1 \%$).

Prédiction des températures de cuisson à cœur

De la même façon, l'AED peut permettre de prédire précisément la température de cuisson à cœur des steaks avec toutefois une prédiction moindre pour les steaks marinés. La corrélation de l'énergie de dénaturation avec la température finale à cœur est meilleure pour les steaks nature

($R^2 = 0,806$) que pour les steaks marinés ($R^2 = 0,678$). Pour les steaks nature, la température du grill n'a pas d'influence sur la valeur de l'énergie de dénaturation alors qu'elle est influente sur celle des steaks marinés ($p < 1\%$).

Malgré tout, le rendement permet lui aussi de prédire de manière très satisfaisante la température finale de cuisson à cœur sans influence du traitement du muscle (nature versus mariné) ou de la température du grill ($200 \text{ }^\circ\text{C}$ versus $240 \text{ }^\circ\text{C}$). La corrélation du rendement avec la température finale de cuisson à cœur vaut $R^2 = 0,833$, steaks nature et marinés confondus.

Prédiction des niveaux de cuisson

Enfin, l'AED peut permettre de distinguer de manière très précise et non subjective le niveau de cuisson des steaks cuits. Cette distinction est, comme pour la prédiction des températures de cuisson à cœur, meilleure en steaks nature qu'en steaks marinés. Ainsi, comme le montre le tableau 1, l'AED distingue bien les niveaux de cuisson cru/bleu/saignant et à point pour les steaks nature. Pour les steaks marinés, l'AED n'arrive pas à distinguer les niveaux saignant/à point et trop cuit.

L'énergie de dénaturation protéique peut permettre de prédire de manière satisfaisante le temps de cuisson de steaks cuits au grill dans une plage de 200 °C à 240 °C, leur température finale de cuisson à cœur, et leur niveau de cuisson. Toutefois, le traitement de marinage perturbe les profils de dénaturation protéique en induisant une pré-dénaturation avant cuisson.

Aussi la caractérisation de la cuisson est-elle moins efficace pour des produits marinés par rapport à des homologues nature. Enfin, l'AED n'est pas du tout adaptée pour prédire la jutosité de steaks cuits au grill. Dans ce cas, la mesure des rendements est plus performante.

CONCLUSION GÉNÉRALE

Champs d'application de l'AED

On peut résumer par le tableau ci-dessous (tableau 2), les champs d'application de l'analyse enthalpique différentielle (AED).

Intérêt de l'AED

L'AED est une technique précise qui peut être utilisée pour caractériser de manière objective le niveau de cuisson des viandes nature en distinguant la cuisson bleu de saignant ou de à point traitées quel que soit le format des pièces de viande ou la technique de cuisson (four, grill) par la mesure de l'énergie de dénaturation protéique.

La technologie n'est cependant pas assez précise pour caractériser le niveau de cuisson de produits marinés, le traitement de marinage induisant lui-même une dénaturation des protéines natives avant cuisson. De même, la cuisson au four micro-ondes, technologie de cuisson très hétérogène, n'est pas caractérisable

par AED. D'ailleurs, d'autres indicateurs utilisés dans cette étude tels que le rendement ne se sont pas avérés plus performants.

Limites de l'AED

Compte tenu du choix fait dans cette étude d'analyser des échantillons intégrant le cœur et la surface de pièces de viande cuites, une mesure AED effectuée à partir de ce type d'échantillon n'est pas satisfaisante pour prédire les paramètres de cuisson des pièces cuites. Il s'est avéré difficile de prélever un échantillon homogène de 100 mg, poids maximum nécessaire à l'analyse, représentant l'intégralité de la section des produits. Dans ce cadre, la mesure de l'AED sur un échantillon « global » n'est pertinente que pour des produits dont l'épaisseur est inférieure à 4 cm.

Ainsi, la température de cuisson à cœur ne peut être prédite que pour les steaks nature cuits au grill et les pavés traités au four. De même, le temps de cuisson ne peut être prédit par l'AED que pour les steaks natures cuits au grill.

Un indicateur plus simple peut être employé pour prédire les paramètres de cuisson appliqués au produit (durée et température finale à cœur) : le rendement de cuisson. Il fonctionne pour les steaks cuits au grill, les rôtis cuits au four, les pavés cuits au four. De plus, le rendement est adapté pour prédire la jutosité des steaks cuits au grill ou de pavés traités au four. Il ne s'agit malgré tout que d'un indicateur partiel des caractéristiques sensorielles.

Application de l'AED

L'AED est beaucoup appliquée au niveau industriel mais peu dans le secteur des protéines.

Les applications les plus courantes en industrie agroalimentaires concernent les lipides. Dans le cadre de cette étude, l'AED a été employée pour essayer d'obtenir une information globale à partir de produits cuits de manière hétérogène.

L'application testée correspond donc à une limite car de nombreuses études ont montré l'intérêt indéniable de cette technique pour caractériser et comprendre la cuisson de produits traités à température basse, inférieure à 100 °C, tels que les produits cuits sous vide (cf. bibliographie dans la partie contexte et objectifs).

L'intérêt de l'emploi de l'AED à un stade industriel pour caractériser le niveau de cuisson de produits traités avec des technologies hétérogènes (grillage, rôtissage) est donc mitigé. Si elle permet de distinguer les niveaux de cuisson de manière précise, son coût reste élevé au regard des autres techniques disponibles telles que la thermométrie filaire ou embarquée (cf. tableau 3).

L'investissement d'un industriel sur cette technologie est donc soumis à la condition de pouvoir l'utiliser pour d'autres applications.

Comme dans l'industrie du pet-food, une des applications supplémentaires de l'AED dans l'industrie des viandes pourrait être la réalisation de tests prédictifs de la stabilité à l'oxydation des lipides contenus dans les matières premières.

En effet, compte tenu de l'incidence déterminante de l'oxydabilité des lipides des viandes sur le goût de produits cuits ou sur la couleur des UVCI conditionnés sous atmosphère protectrice, l'AED pourrait constituer un test rapide, plus facile à mettre en œuvre qu'une composition en acides gras par CPG, ou d'autres tests accélérés tels que le Rancimat.

Cette étude a été financée grâce au concours d'Interbev et de France Agrimer.



Tableau 2
SYNTHÈSE DES APPLICATIONS DE L'AED POUR PRÉDIRE
LES CARACTÉRISTIQUES DE CUISSON DE VIANDES CUITES À PARTIR D'ÉCHANTILLONS
INTÉGRANT CŒUR ET SURFACE DES PIÈCES

	Prédiction du temps de cuisson	Prédiction de la température à cœur de cuisson	Prédiction des niveaux de cuisson	Prédiction de la jutosité
Steaks cuits au grill (200 °C/240 °C)	Steaks nature	Steaks nature	Steaks nature	
Steaks cuits au four micro-ondes 900 W				
Rôtis cuits au four (180 °C/210 °C)				
Pavés cuits au four ou au grill		Four		Four
		Grill		Grill

AED efficace AED inadaptée

Tableau 3
TECHNIQUES DISPONIBLES POUR LE CONTRÔLE DE LA CUISSON

	Coût	Contrôle		Précision	Polyvalence	Type de contrôle
		Pendant la cuisson	Après la cuisson			
Analyse sensorielle	200 à 400 € par produit analysé	Non	Oui	+/-	+	Destructif
Thermométrie filiaire	3 500 à 11 000 € pour un système d'enregistrement	Oui	Oui	+	-	Intrusif
Thermométrie embarquée	2 300 à 2 400 € par sonde	Non	Oui	+	-	Destructif
AED	45 000 à 55 000 €	Non	Oui	++	++	Destructif

BIBLIOGRAPHIE

BRUNTON N.P. et al. (2006). The use of dielectric properties and other physical analyses for assessing protein denaturation in beef biceps femoris muscles during cooking from 5 to 85°C. *Meat Sci.*, 72, 236-244.

CULIOLI J. (1994). Le chauffage de la viande, incidence sur la dénaturation des protéines et la texture. *Viandes et Produits carnés* 15, 159-164.

ELLEKJAER M.R. (1991). Assessment of maxima cooking temperature of previously treated beef. Part 2 : Differential scanning calorimetry. *J. Sci. Food Agric.*, 60, 255-261.

KAMOUN M. ET AL. (1989). Thermal behaviour of muscle tissue analysed by differential scanning calorimetry : Influence of post mortem time. *Sci. Aliments*, 9, 685-700.

MARTENS H. ET AL. (1982) Texture and colour changes in meat during cooking related to thermal denaturation of muscle proteins. *J. Food Texture*, 13, 291-309.