

CONTRIBUTION A L'ETUDE DE L'INDEX GLYCEMIQUE ET SES APPLICATIONS CHEZ LES CARNIVORES DOMESTIQUES

THESE
pour obtenir le grade de
DOCTEUR VETERINAIRE

DIPLOME D'ETAT

*présentée et soutenue publiquement en 2005
devant l'Université Paul-Sabatier de Toulouse*

par

Nicolas, Georges PUCHEU
Né, le 24 Janvier 1980 à DRANCY (Seine-St-Denis)

Directeur de thèse : Madame le Docteur Nathalie PRIYMENKO

JURY

PRESIDENT :
M. Claude MOULIS

Professeur à l'Université Paul-Sabatier de TOULOUSE

ASSESEUR :
Mme Nathalie PRIYMENKO
Mme Lydie BRET-BENNIS

Maître de Conférences à l'Ecole Nationale Vétérinaire de TOULOUSE
Maître de Conférences à l'Ecole Nationale Vétérinaire de TOULOUSE

Toulouse, 2005

NOM : PUCHEU

PRENOM : NICOLAS

TITRE: CONTRIBUTION A L'ETUDE DE L'INDEX GLYCEMIQUE ET SES APPLICATIONS CHEZ LES CARNIVORES DOMESTIQUES.

RESUME :

L'index glycémique est une mesure apportant des précisions sur la réponse biologique consécutive à l'ingestion de glucides. Il repose sur la comparaison de l'élévation de la glycémie provoquée par un aliment testé par rapport à un aliment de référence.

Les applications principales de l'index glycémique en médecine humaine concernent la gestion du diabète et la prise en charge de l'obésité, et, d'une manière générale, permettent une meilleure compréhension du mécanisme d'assimilation des glucides par l'organisme. Cependant cet outil nécessite des adaptations en médecine vétérinaire. Ce travail expose l'état actuel des connaissances sur ce sujet en médecine humaine, ainsi que les perspectives de son développement en médecine vétérinaire, notamment pour les aliments diététiques.

Mots clés :

Index Glycémique, Glucide, Glycémie, Carnivore domestique, Diabète, Obésité, Alimentation, Alimentation de l'homme, Chien, Chat

TITLE: CONTRIBUTION TO THE STUDY OF THE GLYCEMIC INDEX AND ITS APPLICATIONS IN DOMESTIC CARNIVORA

ABSTRACT:

The glycemic index is a method of measurement clarifying our knowledge of the biological response following the ingestion of glucides. It is based upon the comparison between the rise of glycemia caused by one specific feed tested in relation to a reference feed.

The main applications of the glycemic index in human medicine concern diabetes management and obesity care, and generally speaking, allow a better understanding of the mechanisms of glucide assimilation by the organism. However, such a tool needs adaptations to veterinary medicine. This work is a review of the current knowledge on that subject in human medicine, and of the perspectives of the development of its use in veterinary medicine, especially in the field of diet feeds.

KEYWORDS:

Glycemic index, glucide, Glycemia, domestic carnivora, diabetes, obesity, feeding, human feeding, dog, cat

MINISTERE DE L'AGRICULTURE ET DE LA PECHE
ECOLE NATIONALE VETERINAIRE DE TOULOUSE

Directeur	: M.	P. DESNOYERS
Directeurs honoraires.....	: M.	R. FLORIO
	M.	J. FERNEY
	M.	G. VAN HAVERBEKE
Professeurs honoraires.....	: M.	A. BRIZARD
	M.	L. FALIU
	M.	C. LABIE
	M.	C. PAVAU
	M.	F. LESCURE
	M.	A. RICO
	M.	A. CAZIEUX
	Mme	V. BURGAT
	M.	D. GRIESS
	M.	J. CHANTAL
	M.	J.-F. GUELF
	M.	M. ECKHOUTTE

PROFESSEURS CLASSE EXCEPTIONNELLE

- M. **CABANIE Paul**, *Histologie, Anatomie pathologique*
- M. **DARRE Roland**, *Productions animales*
- M. **DORCHIES Philippe**, *Parasitologie et Maladies Parasitaires*
- M. **TOUTAIN Pierre-Louis**, *Physiologie et Thérapeutique*

PROFESSEURS 1^{ère} CLASSE

- M. **AUTEFAGE André**, *Pathologie chirurgicale*
- M. **BODIN ROZAT DE MANDRES NEGRE Guy**, *Pathologie générale, Microbiologie, Immunologie*
- M. **BRAUN Jean-Pierre**, *Physique et Chimie biologiques et médicales*
- M. **DELVERDIER Maxence**, *Histologie, Anatomie pathologique*
- M. **EUZEBY Jean**, *Pathologie générale, Microbiologie, Immunologie*
- M. **FRANC Michel**, *Parasitologie et Maladies Parasitaires*
- M. **MARTINEAU Guy-Pierre**, *Pathologie médicale du Bétail et des Animaux de basse-cour*
- M. **MILON Alain**, *Pathologie générale, Microbiologie, Immunologie*
- M. **PETIT Claude**, *Pharmacie et Toxicologie*
- M. **REGNIER Alain**, *Physiopathologie oculaire*
- M. **SAUTET Jean**, *Anatomie*
- M. **SHELCHER François**, *Pathologie médicale du Bétail et des Animaux de basse-cour*

PROFESSEURS 2^e CLASSE

- Mme **BENARD Geneviève**, *Hygiène et Industrie des Denrées Alimentaires d'Origine Animale*
- M. **BERTHELOT Xavier**, *Pathologie de la Reproduction*
- M. **CONCORDET Didier**, *Mathématiques, Statistiques, Modélisation*
- M. **CORPET Denis**, *Science de l'Aliment et Technologies dans les industries agro-alimentaires*
- M. **DUCOS Alain**, *Zootecnie*
- M. **DUCOS DE LAHITTE Jacques**, *Parasitologie et Maladies parasitaires*
- M. **ENJALBERT Francis**, *Alimentation*
- M. **GUERRE Philippe**, *Pharmacie et Toxicologie*
- Mme **KOLF-CLAUW Martine**, *Pharmacie -Toxicologie*
- M. **LEFEBVRE Hervé**, *Physiologie et Thérapeutique*
- M. **LIGNEREUX Yves**, *Anatomie*
- M. **PICAVET Dominique**, *Pathologie infectieuse*

PROFESSEUR ASSOCIE

- M. **HENROTEAUX Marc**, *Médecine des carnivores*

INGENIEUR DE RECHERCHES

- M. **TAMZALI Youssef**, *Responsable Clinique équine*

PROFESSEURS CERTIFIES DE L'ENSEIGNEMENT AGRICOLE

- Mme **MICHAUD Françoise**, *Professeur d'Anglais*
- M. **SEVERAC Benoît**, *Professeur d'Anglais*

MAÎTRE DE CONFERENCES HORS CLASSE

M. **JOUGLAR Jean-Yves**, *Pathologie médicale du Bétail et des Animaux de basse-cour*

MAÎTRE DE CONFERENCES CLASSE NORMALE

M. **ASIMUS Erik**, *Pathologie chirurgicale*
M. **BAILLY Jean-Denis**, *Hygiène et Industrie des Denrées Alimentaires d'Origine Animale*
M. **BERGONIER Dominique**, *Pathologie de la Reproduction*
M. **BERTAGNOLI Stéphane**, *Pathologie infectieuse*
Mme **BOUCRAUT-BARALON Corine**, *Pathologie infectieuse*
Mlle **BOULLIER Séverine**, *Immunologie générale et médicale*
Mme **BOURGES-ABELLA Nathalie**, *Histologie, Anatomie pathologique*
M. **BOUSQUET-MELOU Alain**, *Physiologie et Thérapeutique*
Mme **BRET-BENNIS Lydie**, *Physique et Chimie biologiques et médicales*
M. **BRUGERE Hubert**, *Hygiène et Industrie des Denrées Alimentaires d'Origine Animale*
Mlle **CADIERGUES Marie-Christine**, *Dermatologie*
Mme **CAMUS-BOUCLAINVILLE Christelle**, *Biologie cellulaire et moléculaire*
Mme **COLLARD-MEYNAUD Patricia**, *Pathologie chirurgicale*
Mlle **DIQUELOU Armelle**, *Pathologie médicale des Equidés et des Carnivores*
M. **DOSSIN Olivier**, *Pathologie médicale des Equidés et des Carnivores*
M. **FOUCRAS Gilles**, *Pathologie du bétail*
Mme **GAYRARD-TROY Véronique**, *Physiologie de la Reproduction, Endocrinologie*
M. **GUERIN Jean-Luc**, *Productions animales*
Mme **HAGEN-PICARD Nicole**, *Pathologie de la Reproduction*
M. **JACQUIET Philippe**, *Parasitologie et Maladies Parasitaires*
M. **JAEG Jean-Philippe**, *Pharmacie et Toxicologie*
M. **LYAZRHI Faouzi**, *Statistiques biologiques et Mathématiques*
M. **MARENDA Marc**, *Pathologie de la reproduction*
M. **MATHON Didier**, *Pathologie chirurgicale*
Mme **MESSUD-PETIT Frédérique**, *Pathologie infectieuse*
M. **MEYER Gilles**, *Pathologie des ruminants*
M. **MONNEREAU Laurent**, *Anatomie, Embryologie*
Mme **PRYMENKO Nathalie**, *Alimentation*
Mme **RAYMOND-LETRON Isabelle**, *Anatomie pathologique*
M. **SANS Pierre**, *Productions animales*
Mlle **TRUMEL Catherine**, *Pathologie médicale des Equidés et Carnivores*
M. **VERWAERDE Patrick**, *Anesthésie, Réanimation*

MAÎTRE DE CONFERENCES CONTRACTUELS

M. **CASSARD Hervé**, *Pathologie du bétail*
N. **DESMAIZIERES Louis-Marie**, *Clinique équine*
M. **LEON Olivier**, *Elevage et santé en productions avicoles et porcines*

MAÎTRE DE CONFERENCES ASSOCIE

M. **REYNOLDS Brice**, *Pathologie médicale des Equidés et Carnivores*

ASSISTANTS D'ENSEIGNEMENT ET DE RECHERCHE CONTRACTUELS

M. **CORBIERE Fabien**, *Pathologie des ruminants*
Mlle **LACROUX Caroline**, *Anatomie pathologique des animaux de rente*
Mme **MEYNADIER-TROEGELER Annabelle**, *Alimentation*
M. **MOGICATO Giovanni**, *Anatomie, Imagerie médicale*
Mlle **PALIERNE Sophie**, *Chirurgie des animaux de compagnie*

Remerciements

A notre président de thèse

Monsieur le Professeur Claude Moulis

Professeur des Universités

Biodiversité Végétale et Substances Naturelles

Qui nous a fait l'honneur d'accepter la présidence de notre jury de thèse,

Hommage respectueux

A notre jury de thèse

Madame le Docteur Nathalie PRIYMENKO

Maître de Conférences de l'Ecole Nationale Vétérinaire de Toulouse

Alimentation

Qui a bien voulu nous apporter son soutien pour cette thèse

Qu'elle trouve ici l'expression de notre profond respect et de notre gratitude.

Madame le Docteur Lydie BRET-BENNIS

Maître de Conférences de l'Ecole Nationale Vétérinaire de Toulouse

Physique et Chimie biologiques et médicales

Qui nous a fait l'honneur de participer à notre jury de thèse,

Tout notre respect et notre reconnaissance.

A mes parents

pour leurs encouragements constants et l'intérêt qu'ils ont porté à ce travail, ainsi que pour tout ce que je leur dois.

A mes grands-mères et à mon grand-père

A mes cousins, Michaël et Jérémie

A mes amies et mes amis, et tous ceux qui comptent pour moi

Remerciements spéciaux :

- A Fosti « cabriolet »

Une âme d'enfant dans un corps... d'enfant, et un talent indéniable pour rénover des expressions surannées : c'est vrai, ça casse pas trois briques à un canard !

- A Olive « major »

Ses castors de combat, sa serpillière au chômage technique et sa carte bleue « oursin » n'occultent pas son âme de canineman à tendance boomophile,

- A Paul « pintaro »

Qui manie comme personne les brebis, et malgré une forte consommation en Border Collie ne désespère pas un jour d'arriver à trouver le parfait chien de berger,

- A Eric « lozèreman »

Grâce à lui nous avons tous pu découvrir les joies et les côtés pittoresques de la Lozère, qu'il en soit ici mille fois maudit !

- A Psy « chui fin ! »,

Bon courage pour l'épreuve qui t'attend, et prépare-toi à la paternité, je pense qu'il y a encore pas mal de travail, un bébé ça ne mange pas que des confitures,

- A Mathieu « brice »

Pour l'année de T1pro que nous avons passé ensemble et où, je peux témoigner sous serment, pas une fois tu n'es arrivé avec plus de 3 heures de retard,

- A Arnaud « détritrus »

Le seul adversaire valable dans une joute textuelle sur internet, qui cache mal sous des dehors cyniques et opportunistes une véritable âme de cynique opportuniste,

- A Fabrice « dumbo »

Créole et pas trop surfeur, merci pour la Martinique et ton appart, continue longtemps de rire car je ne m'en lasserai jamais.

- A Christine, No, Justine, Tiphaine, Céline

Merci pour vos quelques décigrammes de finesse dans ce lot de brutes

- A mes chats, surtout fifi

-A J.

TABLE DES MATIERES

Introduction.....	5
<u>Ière partie</u> : Données actuelles sur l'index glycémique chez l'homme ..	7
A) Qu'est-ce que l'index glycémique ? :.....	8
B) Historique et recommandations actuelles concernant l'index glycémique :	12
<u>IIème partie</u> : Acquis et perspectives concernant les maladies chez l'homme et l'animal.....	19
A) Index glycémique et diabète :	20
1) Index glycémique et diabète chez l'homme :	20
2) Index glycémique et diabète chez les animaux :	23
B) Index glycémique et obésité :	25
1) Index glycémique et obésité chez l'homme :	25
2) Index glycémique et obésité chez les animaux :	27
C) Autres maladies :	30
<u>IIIème partie</u> : Discussion	34
A) Considérations méthodologiques :	35
1) Facteurs pré-analytiques :	35
1.1) Facteurs de variation inhérents à l'aliment :	35
1.2) Facteurs de variation inhérents à l'animal :	41
1.3) Bilan sur la variabilité intra- et inter-individuelle :	46
2) Facteurs analytiques :	48
3) Traitement des résultats :	49
B) Perspectives d'avenir sur l'utilisation de l'index glycémique :	53
Conclusion	55
Bibliographie.....	57

Introduction

L'étude *in vitro* et la modélisation sont souvent très intéressantes pour approcher la réalité biologique, mais il arrive parfois que des principes apparemment logiques s'avèrent erronés. Ainsi la classification des hydrates de carbones selon leur formule chimique, en glucides simples pour les monomères et en glucides complexes pour les polymères, a-t-elle naturellement conduit à l'extrapolation usuelle en sucres « rapides » et sucres « lents ». En toute logique, les monomères sont immédiatement disponibles, alors que les polymères doivent d'abord être hydrolysés pour pouvoir être assimilés. L'hydrolyse nécessitant du temps, les glucides complexes sont disponibles plus tardivement et sont donc des sucres lents.

Cette notion (trop) simple est encore employée aussi bien en médecine humaine que vétérinaire. Or, un amidon, glucide complexe, est généralement rendu très digeste après cuisson, donc acquiert un comportement de glucide « rapide », et le fructose des fruits, glucide simple, est lentement assimilé *in vivo*, donc mériterait le nom de sucre lent.

La classification « historique » des glucides s'est donc avérée inexacte pour rendre compte de la réalité biologique. Une autre méthode, dite de l'index glycémique, s'est imposée. Elle consiste à mesurer l'élévation de la glycémie obtenue après avoir consommé un aliment testé, par rapport à celle obtenue avec du glucose servant d'étalon. On peut alors hiérarchiser les glucides en fonction de l'effet physiologique induit au moyen du calcul de l'index glycémique des aliments.

Ce concept est apparu en alimentation humaine il y a une vingtaine d'années. Ses applications pratiques n'ont cependant été mises en évidence que plus récemment. De très nombreuses publications dans de grandes revues de nutrition humaine démontrent son utilité en complément des règles nutritionnelles courantes pour la gestion du diabète notamment, mais il présente un intérêt aussi dans d'autres domaines comme l'hypertension et la prévention des cancers ou des maladies coronariennes...

L'index glycémique peut être transposé dans le domaine de la nutrition vétérinaire, mais la multiplicité des espèces et des aliments disponibles expliquent le faible nombre de publications à ce sujet.

Le but de cette thèse est de présenter le concept d'index glycémique chez l'homme dans un premier temps. Les applications pratiques dans les maladies comme le diabète et l'obésité sont ensuite présentées, chez l'homme comme chez l'animal. Enfin, les problèmes et questions soulevés par ce concept seront abordés et discutés avant de proposer des perspectives d'utilisation chez les carnivores domestiques.

I^{ère} partie

Données actuelles sur l'index
glycémique chez l'homme

A) Qu'est ce que l'index glycémique ? :

L'index glycémique est une méthode de classement des aliments d'après leur réponse glycémique post-prandiale en comparaison à un aliment de référence. C'est un moyen de hiérarchiser les aliments sur une échelle en fonction de leur capacité à augmenter la glycémie après ingestion [41].

Une définition officielle a été donnée en 1997 lors d'une consultation des experts du FAO (Food and Agriculture Organisation) :

« L'index glycémique est défini comme le rapport de l'aire sous la courbe de glycémie sanguine en réponse à 50 grammes de glucides contenus dans un aliment à tester, exprimé en pourcentage de la réponse à une même quantité de glucides d'un aliment de référence pris par le même sujet. » [17]

Pour préciser la définition, on peut donc dire que l'index glycémique se définit comme l'effet hyperglycémiant d'un aliment comparé à celui d'un liquide glucosé de référence. Ceci nous amène à préciser la notion de « glucide ». L'aliment testé doit contenir 50 grammes de glucides disponibles. Les glucides sont ici envisagés au sens large d'« hydrates de carbone », mais, afin de ne pas fausser les résultats, les fibres totalement résistantes à la digestion ne devraient pas être comptabilisées dans les 50 grammes [41]. La manière selon laquelle ces fibres sont déterminées est souvent subjective, et fera l'objet d'une étude lors de la discussion.

Pour déterminer l'index glycémique d'un aliment, on réalise des courbes de glycémie, généralement chez 6 à 12 sujets sains ou diabétiques après une nuit de jeûne. En abscisse des courbes, on reporte le temps à partir du moment de l'ingestion de l'aliment test ou de l'aliment de référence ; en ordonnée on reporte les valeurs de la glycémie. L'index est calculé par une fraction, dont le numérateur est la surface mesurée sous la courbe glycémique durant deux heures, après ingestion de

cinquante grammes de glucides contenus dans l'aliment testé, et le dénominateur est cette surface mesurée pour une solution standard de 50 grammes de glucose [8].

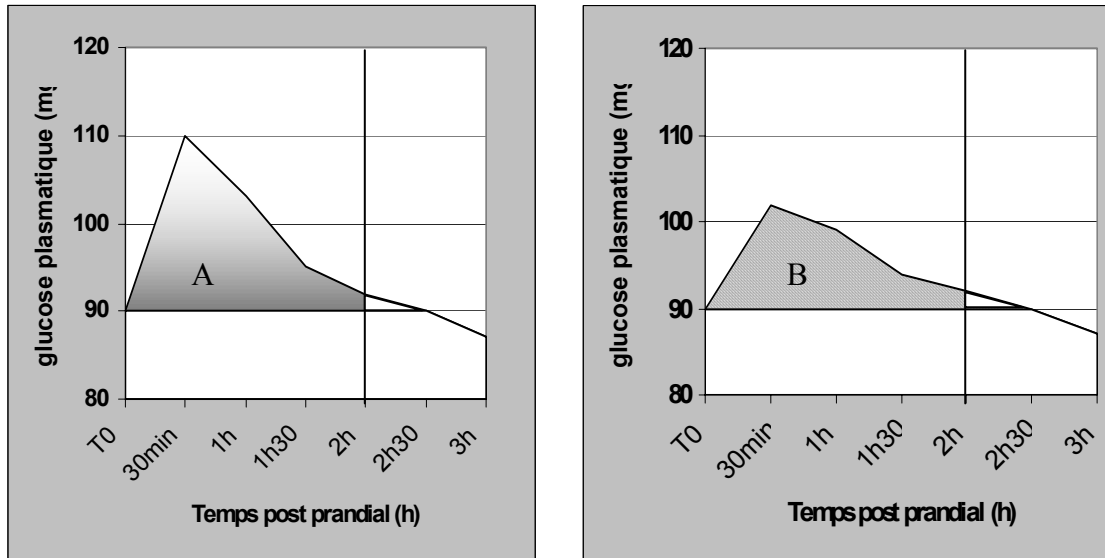


Figure 1 : courbes de glycémie obtenues après l'ingestion de glucose (A) et après l'ingestion d'un aliment à tester (B)

La figure 1 représente les courbes de glycémie après l'ingestion de 50 grammes de glucose et après l'ingestion d'un aliment à tester (schématiquement). Les aires sous la courbe comptabilisées sont grisées et rayées. T_0 représente le moment de la fin de l'ingestion ; les aires ne sont plus comptabilisées au delà de 2 heures. L'index glycémique est donc le rapport, exprimé en pourcentage, des valeurs numériques de l'aire rayée divisée par l'aire grisée, ce qui donne : Index Glycémique= $(B \times 100) / A$

Seule l'aire « positive » est comptabilisée, c'est à dire que le niveau zéro pour le calcul de l'aire de la courbe est la valeur de la glycémie de l'individu à jeun. Ainsi, dès que la courbe de glycémie repasse sous cette valeur, l'aire n'est plus comptabilisée.

Bien sûr, plus les mesures de la glycémie d'un sujet sont nombreuses, plus la courbe est proche de la réalité et plus le résultat sera juste. Cependant, des mesures de la glycémie effectuées tous les quarts d'heure sont en pratique suffisantes pour

obtenir des valeurs de l'index glycémique valables chez l'homme, le seul impératif étant d'effectuer les prélèvements sanguins dans les mêmes délais après l'ingestion pour l'aliment test et l'aliment de référence.

L'index glycémique est donc un pourcentage de deux aires sous la courbe, l'une d'un aliment test, et l'autre d'un aliment de référence, le plus souvent des tablettes de glucose ou du sirop de glucose mais parfois du pain blanc ou du riz blanc [57], qui sont eux aussi absorbés rapidement. Les aliments sont répartis le long d'une échelle de 10 à 100% d'index glycémique. Un simple facteur de conversion permet de passer d'un index établi avec un aliment de référence à un index établi au moyen d'un autre aliment de référence [57].

L'index étant un rapport, la quantité d'aliment testée, donc de glucides ingérés, importe en réalité peu, à partir du moment où elle est la même pour l'aliment à indexer et pour l'aliment de référence. On peut, par exemple, effectuer des expériences avec un aliment contenant 75 grammes de glucides, et se servir de 75 grammes de glucose comme référence [6]. Cependant, dans un souci de standardisation, la plupart des mesures sont effectuées avec un aliment contenant 50 grammes de glucides chez l'homme, ainsi que l'indique la définition de la FAO. Il n'y a pas, à ce jour, de quantité définie chez les carnivores domestiques.

Pratiquement, un aliment avec un haut index glycémique, bien que contenant la même quantité de glucides qu'un autre aliment ayant un index plus bas, induit un pic de glycémie plus important et une plus grande aire sous la courbe. Ceci sera détaillé dans la partie discussion.

L'index glycémique est une mesure soumise à de nombreuses variations, et, parmi les plus importantes, le fait qu'il ne soit possible de mesurer que la glycémie veineuse ou capillaire. Depuis l'estomac, de nombreux organes ou tissus consomment ce glucose puisqu'il s'agit d'un nutriment immédiatement utilisable par toutes les cellules.

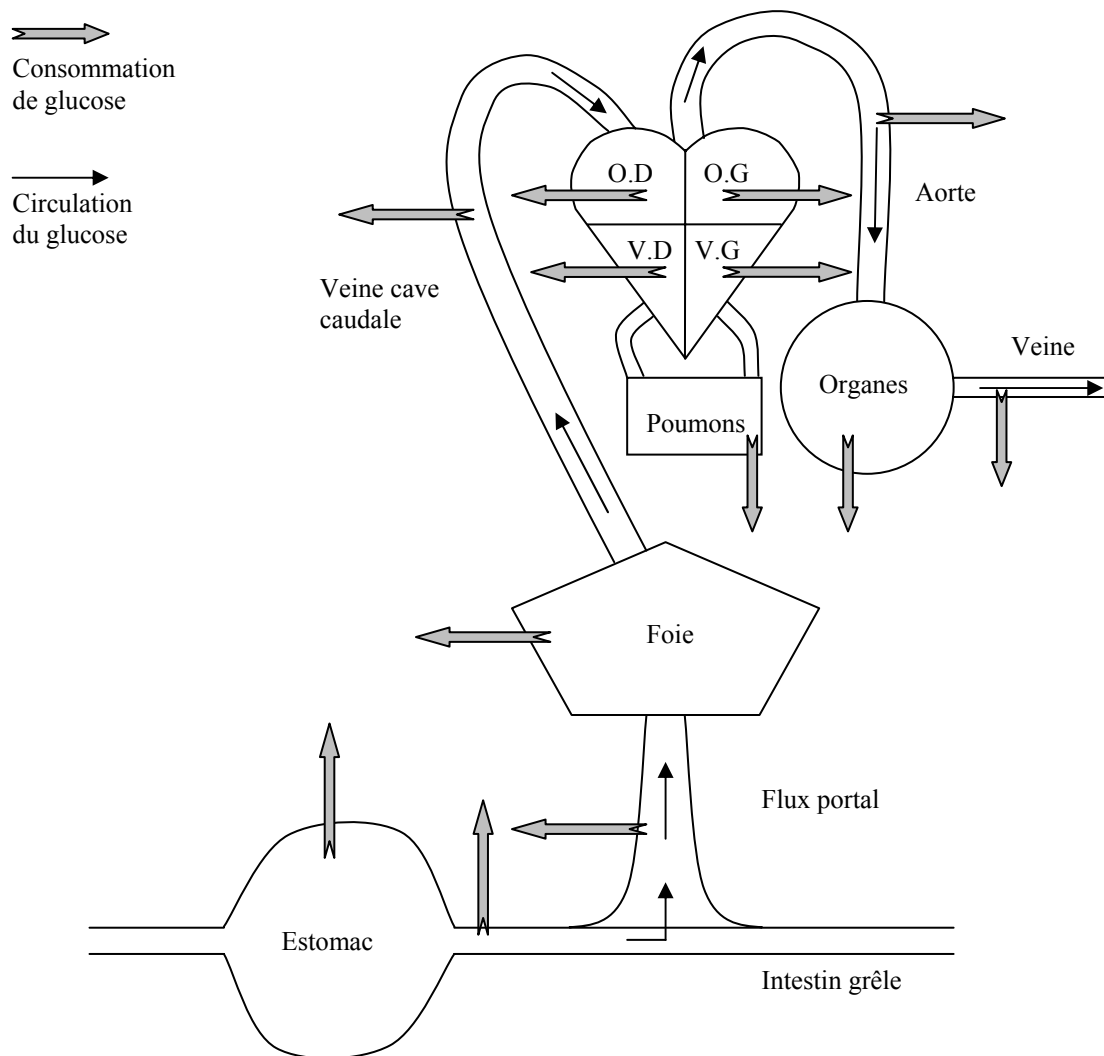


Figure 2 : Représentation schématique des flux de glucose et des principales zones de consommation avant l'arrivée dans les veines.

La figure 2 présente les zones de consommation de glucose, les pertes les plus importantes se situant au niveau du foie et des organes. Le flux portal détermine la vitesse de transit du glucose entre l'intestin et le foie. Il augmente après les repas et diminue lors d'exercices physiques, et est soumis à de nombreuses variations.

Du fait de ces déperditions et de la variabilité des flux sanguins, l'index glycémique n'est pas une mesure exacte de la quantité de glucides contenue dans un aliment, mais plutôt une mesure de la réponse intégrée de l'organisme à l'ingestion d'un aliment. Les autres facteurs de variation de l'index glycémique seront abordés dans la partie discussion.

B) Historique et recommandations actuelles concernant l'index glycémique :

Si les études menées par des précurseurs ont commencé dès les années 70 à remettre en question le concept de glucide rapide/monomère et glucide lent/polymère, ce n'est véritablement qu'en 1981 que Jenkins *et al* [29] ont créé la notion d'index glycémique. L'idée était de comparer les aliments entre eux selon l'importance quantitative de la réponse glycémique post-prandiale. Cette méthode a permis de montrer que la distinction entre sucres rapides et sucres lents était inexacte pour décrire la réalité biologique. Le fait de mesurer la réponse physiologique obtenue pour répartir les glucides tout au long d'une échelle entre 10 et 100% d'index glycémique permettait de s'affranchir de la nature simple ou complexe du glucide considéré, et de juger plus facilement de ses effets dans l'organisme.

Le concept ne fut pas immédiatement adopté. Quelques études vinrent même infirmer les premiers résultats [15], créant un doute sur le bien fondé de cette théorie, puis de nombreux autres auteurs confirmèrent à nouveau la validité des premières expériences.

De nos jours, même si une minorité de spécialistes continuent de contester les implications de cette notion [49], le concept en lui même est beaucoup moins discuté.

L'index glycémique est une avancée considérable en nutrition car il s'agit d'un paramètre physiologique et intégré, qui définit objectivement les modifications de la glycémie consécutives à l'ingestion d'un aliment, alors que pour les autres nutriments, on en reste aux quantités telles que définies dans les Apports Nutritionnels Conseillés (A.N.C., définis par les experts), ou encore les Apports Journaliers Recommandés (A.J.R., exigés par le législateur). Avec la notion d'index glycémique, on ne s'intéresse plus à la composition chimique de l'aliment en tant que telle, mais à la réponse biologique consécutive à son ingestion.

Actuellement, l'index glycémique est l'instrument de mesure le plus fiable, compte tenu des connaissances médicales, pour quantifier la cinétique de l'absorption d'un aliment.

Chez l'homme, les recommandations alimentaires actuelles vont dans le sens de la sélection d'aliments à faible index glycémique, non seulement pour les personnes atteintes d'obésité ou de diabète, mais aussi pour le grand public [51].

En pratique, quel est l'intérêt de la consommation d'un aliment à bas index glycémique par rapport à un aliment à haut index glycémique ?

Après ingestion d'un aliment de fort index glycémique, on observe une hausse rapide de la glycémie et, en réponse, une augmentation de la concentration sanguine d'insuline [48] par stimulation de la sécrétion pancréatique et une baisse concomitante de la concentration sanguine en glucagon. L'anabolisme et le stockage des substrats lipidiques et glucidiques entrants est majoritaire, ce qui entraîne une stimulation de la glycogénèse et de la lipogénèse et un freinage de la néoglucogénèse et de la lipolyse

De plus, après une sécrétion importante d'insuline, une hypoglycémie réactionnelle peut se produire de 2 à 4 heures après le repas. Pour revenir à un état d'homéostasie, l'organisme déclenche une cascade de sécrétions hormonales dites de contre-régulation (glucagon, épinéphrine, cortisol, hormones de croissance), qui permettent de diminuer et stabiliser la glycémie.

Après l'ingestion d'un aliment de faible index glycémique, les sécrétions hormonales dans leur ensemble, et d'hormones de contre-régulation en particulier, sont plus étalées dans le temps et moins importantes, ce qui représente une "économie" notable pour l'organisme.

Outre cet aspect, des études chez l'homme démontreraient aussi l'intérêt des aliments à faible index glycémique dans la prévention du syndrome métabolique (qui consiste en la présence simultanée chez un individu d'une hyperinsulinémie et d'une insulino-résistance) [11]. Les cancers semblent aussi être une conséquence d'une alimentation de fort index glycémique [9] [4], en particulier les cancers du sein [3] et les cancers colo-rectaux [20] [12]. La consommation d'aliments à fort index

glycémique semble être un facteur de risque de l'obésité et des maladies cardiovasculaires [40] [28] comme les cardiopathies ischémiques [33]. Enfin, l'index glycémique convient mieux comme indicateur prévisionnel de la concentration sérique du cholestérol HDL que la valeur de la consommation lipidique journalière [22]. La communauté scientifique manifeste un intérêt certain pour cette notion, comme en témoignent les nombreux articles publiés. Cependant avant de conclure définitivement à l'existence de ces propriétés, il convient de confirmer ces résultats au moyen d'études de plus grande ampleur.

Tous ces intérêts expliquent la présentation qui est faite de cette notion au grand public dans les revues de vulgarisation scientifique, mais aussi depuis peu dans des publications à caractère moins formel tels que des guides culinaires, par exemple.

Enfin et surtout, aucun argument en défaveur de la consommation d'aliments à bas index glycémique n'a pu être produit à ce jour, sous réserve bien entendu que les autres propriétés de l'aliment soient correctes (il convient d'éviter les aliments trop gras ou trop riches en sodium par exemple). Il a été prouvé en outre que des conseils nutritionnels sur les aliments de faible index glycémique chez des enfants diabétiques ne conduisaient pas à une limitation trop stricte du nombre d'aliments à leur disposition, ni à la sélection d'aliments déséquilibrés en nutriments [23].

Même si l'image de sucre lent et sucre rapide reste encore profondément ancrée dans les esprits, l'intérêt général qui s'est manifesté pour l'index glycémique permet de penser que l'on va assister dans les années à venir à une meilleure compréhension de la notion et de ses conséquences, et à une réelle installation de ce concept dans la vie courante, bien loin d'un « effet de mode ».

Les nutritionnistes sont maintenant familiarisés avec cette notion, et commencent à proposer d'inclure la notion d'index glycémique dans le cadre de régimes spécifiques. Aux Etats-Unis par exemple, des guides sur l'index glycémique sont développés pour le grand public [58]. En Australie également, le concept d'index

glycémique est sorti du stade de la recherche et est utilisé comme un outil éducatif dans des centres d'enseignement du diabète et des cliniques de sport [8]. En Europe, le régime méditerranéen est reconnu et préconisé à cause de son apport en fibres important et son apport modéré en graisses, ces dernières contenant en outre peu de lipides saturés et de cholestérol. Certaines études démontrent maintenant que ce régime et d'autres du même type sont de surcroît de faible index glycémique [50].

Néanmoins, le problème est complexe et les erreurs d'interprétation peuvent être nombreuses. Ainsi les aliments ayant le plus bas index glycémique sont les aliments riches en lipides, puisqu'ils ralentissent considérablement le temps de vidange gastrique. Si l'on part du principe que pour équilibrer facilement un diabète, il faut consommer des aliments à bas index glycémique, on devrait donc privilégier les aliments riches en lipides. Or, une importante consommation de lipides entraîne rapidement une prise de poids, pouvant conduire à l'obésité, et surtout, le surpoids est une des principales causes d'insulinorésistance, donc de déséquilibre du diabète. Ainsi, l'équilibre idéal est difficile à trouver.

Revenons tout d'abord sur une classification simple des aliments de base :

- Aliments à index glycémique faible : légumes verts et fruits, légumineuses, noix, lait, fructose et lactose...
- Aliments à index glycémique moyen : produits céréaliers non traités, pâtes et saccharose...
- Aliments à index glycémique élevé : produits céréaliers raffinés, céréales toutes prêtes, pommes de terre et glucose...

Le tableau suivant détaille quelques aliments et leur index glycémique :

Tableau 1 : exemples d'index glycémiques de quelques aliments chez l'homme
(d'après [8]) (m=moyenne)

Céréales :		Légumineuses :	
All-Bran® Kellogg's®	30	Haricot blancs petits (m)	48
Chocopops® Kellogg's®	77	Fèves (m)	79
Cornflakes Kellogg's®	77	Haricots beurre (m)	31
Porridge (m)	50	Pois chiches (m)	33
Son de riz	19	Haricots blancs (m)	38
Special K® Kellogg's®	54	Haricots secs (m)	27
Sanitarium Weetabix®	75	Lentilles (m)	28
		Soja (m)	18
Céréales/Pâtes :		Fruits :	
Blé noir	54	Pomme (m)	36
Bulgur	48	Abricots secs (m)	31
Riz		Banane (m)	53
Calrose	83	Cerises (m)	23
Doongara/Basmati	59	Pamplemousse (m)	25
Brun	76	Raisins (m)	43
Sunbrown rapide	80	Kiwi (m)	58
Nouilles	47	Mangue (m)	51
Pâtes		Orange (m)	43
Aux œufs	32	Papaye	56
Ravioli (viande)	39	Pêches	
Spaghetti (m)	41	En boîte, dans jus	30
Vermicelles	35	Fraîches	28
Tacos	68	Poires (m)	36
		Ananas	66
		Prunes	24
		Raisins secs	64
		Raisins secs sultanas	56
		Pastèque	72
Pains :		Produits laitiers :	
Bagel	72	Lait	
Croissant	67	Entier	27
Crêpe grillée (crumpet)	69	Ecrémé	32
Pain (blanc) aux fruits	47	parfum chocolat	34
Pain à l'orge concassé	45	crème anglaise (avec farine)	43
Pain aux céréales (m)	45	Glace (m)	50
Pain au son d'avoine (m)	44	Yaourt parfumé maigre	33
Pita	57		
Pain noir (seigle)	50	Boissons :	
Baguette française	95	Jus de pomme	41
Farine pour pain noir	76	Fanta®	68
Pain blanc (m)	70	Jus d'orange	53
Pain complet (m)	77		
		Collations, en-cas :	
Biscuits salés/pains suédois :		Chips de maïs	72
Pain suédois soufflé	81	Bâtonnets de poisson	38
Craquelin	78	Cacahuètes	14
		Popcorn	55
Gâteaux :		Chips	57
Muffin aux pommes	44	Saucisses	28
Gâteau à la banane	47	Soupe de	
Gâteau de Savoie	46	Lentilles	44
Gaufres	76	petit pois	66
		tomate	38
Légumes :		Confiseries :	
Betterave	64	Chocolats	49
Carottes	49	Mars®	68
Panais	97	Barres de Muesli	61
Petit pois	48		
Pommes de terre		Sucres :	
Cuisinées	85	Miel	58
Nouvelles	62	Fructose	20
Pontiac	56	Glucose	100
Frites	75	Lactose	57
Citrouille	75	Maltose	105
Maïs doux	48	Saccharose	65
Patates douces	48		
Rutabaga	72		
Igname	51		

Ce classement a notamment servi aux Etats-Unis pour élaborer une pyramide d'aliments à index glycémique faible, en vue de permettre l'enseignement d'un régime à faible index glycémique qui soit compatible avec une nutrition correcte.

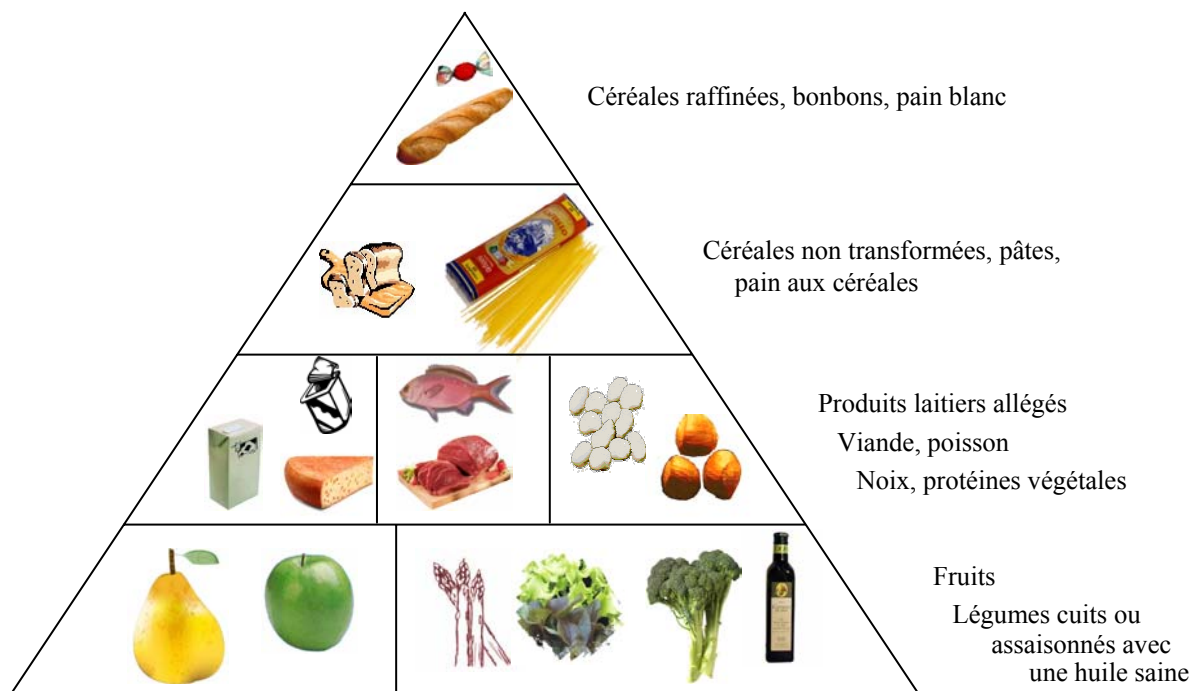


Figure 3: pyramide alimentaire de faible index glycémique (d'après [34] ; [2]).

Il n'existe pas encore de « régime type » clairement défini, mais les personnes en bonne santé peuvent déjà bénéficier des connaissances actuelles sur l'index glycémique. Par exemple, il est conseillé de substituer de façon régulière à des produits transformés d'index glycémique élevé (type céréales extrudées, etc...) des aliments d'index glycémique faible ; ou encore d'intégrer à son régime des aliments à index glycémique faible, riches en fibres et pauvres en graisses comme les légumes et les fruits.

Il n'existe pas d'interdits au sens strict, tout au plus peut-on parler d'un encouragement à limiter la consommation des aliments de fort index glycémique [55].

Il ne faut pas oublier cependant que des recherches supplémentaires sur l'index glycémique et la régulation de la glycémie sanguine s'imposent, surtout en ce qui concerne l'aspect de la réponse au long terme. Il faudrait aussi élargir la population

d'étude, notamment en menant des analyses sur des groupes ethniques et des populations atteintes d'un désordre métabolique autre que le diabète. Afin de pouvoir obtenir une diversité suffisante dans les aliments, de nombreuses études testent des catégories d'aliments appartenant à d'autres régions géographiques que les Etats-Unis [6] [57] [53] [10]. A l'heure actuelle, près de 750 types d'aliments ont été indexés au travers de nombreuses études, les résultats ayant été compilés dans une table internationale [19]. Cependant, de nombreux aliments ne sont pas encore indexés, ce qui nécessiterait aussi des recherches supplémentaires.

II^{ème} partie

Acquis et perspectives concernant les maladies chez l'homme et l'animal:

Une meilleure gestion du diabète insulino-dépendant et une possible amélioration de la prévention de l'obésité sont les principales applications pratiques de l'index glycémique chez l'homme décrites à ce jour. Nous ne nous intéresserons qu'au cas du diabète sucré et, par la suite, la mention de diabète sous-entendra diabète sucré.

L'étude se limitera aux animaux monogastriques non herbivores. En effet, pour les herbivores ou les animaux polygastriques, la réalité biologique est trop éloignée du modèle humain. Nous nous contenterons donc d'aborder les cas des deux carnivores domestiques les plus représentés, le chien et le chat.

A) Index glycémique et diabète :

1) index glycémique et diabète chez l'homme :

Le diabète insulino-dépendant ou de type 1 est lié à la destruction auto-immune des cellules β pancréatiques. Il se traduit par une carence en insuline et requiert donc un traitement par insulinothérapie.

Le diabète de type 2 se caractérise par deux anomalies majeures : une perturbation de la sécrétion des hormones pancréatiques (diminution quantitative et qualitative de la sécrétion d'insuline, augmentation de la sécrétion de glucagon), et une perturbation des effets de l'insuline sur ses tissus cibles : c'est l'insulinorésistance.

Il ne sera traité dans ce chapitre que le diabète de type 1.

La méthode de détermination décrite précédemment chez les sujets sains restant la même, l'index glycémique est mesuré de la même manière chez les personnes diabétiques. Cependant, l'index lui-même pourrait s'avérer différent du fait de la différence d'assimilation du glucose entre les deux types de populations. En effet, chez les diabétiques, le niveau de base de la glycémie à jeun est souvent beaucoup plus haut, le pic post-prandial plus marqué, et la décroissance de la

courbe plus lente, sans oublier qu'il existe d'importantes différences interindividuelles, chaque diabétique étant un cas particulier en fonction de sa sécrétion d'insuline plus ou moins importante.

Quelle attitude adopter en pratique ? Toute personne diabétique doit-elle faire l'objet d'une détermination de son propre index glycémique vis à vis d'un aliment donné, et ce pour toute une gamme d'aliments ? Il va sans dire que ceci n'est pas réalisable, ni même envisageable.

Si l'on examine la formule, on constate que l'index glycémique est un quotient. Chez les diabétiques le numérateur, c'est à dire l'aire sous la courbe pour un aliment testé augmente, mais le dénominateur, l'aire sous la courbe pour un aliment de référence, augmente aussi. Ces deux augmentations se compensent donc partiellement puisque l'index glycémique est un quotient.

La comparaison entre l'index glycémique d'un aliment mesuré chez un sujet sain et celui mesuré chez un sujet diabétique montre que les deux index sont légèrement différents, mais bien corrélés [8]. Un aliment ayant un faible index glycémique chez un individu non diabétique sera aussi un aliment de faible index glycémique chez un diabétique. Plus que la valeur chiffrée de l'index, c'est le classement des aliments selon cet index qui est intéressant, car il est le même pour les diabétiques et les non diabétiques.

Il est donc possible de déterminer l'index glycémique de plusieurs aliments chez des individus sains puis de les classer sur une échelle, pour ensuite extrapoler ces échelles chez les diabétiques. Grâce à cela, l'index glycémique est un outil intéressant dans la gestion correcte du diabète, puisqu'il est possible de mener de nombreuses études sans qu'il soit nécessaire de le faire sur des personnes diabétiques. Cependant, les résultats sont plus exacts s'ils sont obtenus directement grâce à des mesures sur les individus diabétiques.

Il a été prouvé que les aliments à fort index glycémique et pauvres en fibres sont les nutriments les plus diabétogènes. Cependant la suralimentation et la sédentarité, deux facteurs environnementaux favorisant le diabète, jouent un rôle encore plus important dans l'apparition de cette maladie [59].

Les individus diabétiques doivent savoir gérer les relations entre la prise alimentaire et les injections d'insuline pour maintenir leur glycémie dans des limites convenables et éviter les désagréments, voire les dangers d'une hyper ou d'une hypoglycémie.

Très schématiquement, chez les individus non diabétiques, la glycémie est influencée par deux paramètres majeurs, et de nombreux paramètres moins importants permettent sa régulation fine. La prise alimentaire augmente la glycémie, et la sécrétion d'insuline la diminue. La sécrétion n'est pas un processus volontaire, elle est déclenchée par l'organisme en réponse à la prise alimentaire, et est proportionnelle à celle-ci, afin de permettre à la glycémie de rester dans des valeurs convenables. Chez les individus diabétiques, on retrouve ces deux paramètres, à la différence près qu'il ne s'agit pas d'une sécrétion, mais d'une injection d'insuline, qui devient alors un processus volontaire. Il s'agit donc pour le diabétique, et avec les conseils de son médecin, d'imiter la réponse normale de l'organisme et de juger de la quantité d'insuline nécessaire pour faire suffisamment redescendre la glycémie sans la faire chuter en dessous des valeurs normales.

Bien sûr, une personne ne peut pas toujours manger ni les mêmes quantités, ni les mêmes aliments, et doit se limiter à estimer la quantité d'insuline à injecter. La gestion de la quantité correcte à injecter est délicate. Si cette quantité est trop importante, elle déclenche une hypoglycémie, et si elle est trop faible, elle entraîne une hyperglycémie. Un autre problème vient aussi du fait que plus la quantité d'insuline injectée est importante, plus le risque de développer une insulino-résistance est grand. C'est pourquoi beaucoup de personnes considèrent qu'il est difficile de bien équilibrer un diabète. En quoi l'index glycémique peut-il simplifier cette gestion ?

Si l'on considère qu'un aliment à haut index glycémique entraîne un fort pic de glycémie et une aire sous la courbe importante, il convient, pour faire baisser ce pic, d'employer une quantité d'insuline supérieure, ce qui majore les risques d'hypoglycémie réactionnelle et à terme favorise l'insulino-résistance [9]. Les aliments de fort index glycémique augmentent aussi le métabolisme des HDL (High Density Lipoprotein), et conduisent à une prise de poids aggravant à terme le diabète [35].

Inversement, pour un aliment à bas index glycémique, le pic de glucose post-prandial est peu marqué, il suffit d'une faible quantité d'insuline pour le faire revenir à

la normale. Les risques d'hypoglycémie et d'hyperglycémie sont plus faibles, et l'insulinorésistance est retardée car l'insuline est administrée avec parcimonie.

Les recommandations nutritionnelles actuelles incitent les personnes diabétiques à diminuer leurs apports en aliments pauvres en fibres et de fort index glycémique, au profit de la consommation d'aliments riches en fibres et de faible index glycémique [53]. Par contre, des études menées sur des afro-américains et des caucasiens aux Etats-Unis montrent que, ni la consommation d'aliments de faible index glycémique, ni une importante ingestion de fibres n'ont d'effet préventif sur l'incidence du diabète [56].

En réalité, à cause des nombreux paramètres ignorés dans ce modèle volontairement simplifié, le seul fait d'ingérer des aliments à faible index glycémique ne suffit pas à faire diminuer le diabète. Cependant le principe reste valable et mérite des recherches plus approfondies.

2) index glycémique et diabète chez le chien et le chat :

Nous allons essayer de comprendre comment adapter la notion d'index glycémique chez les carnivores domestiques, et quel en serait l'intérêt.

Si la mesure de l'index glycémique de beaucoup d'aliments a été réalisée chez l'homme, il n'en est pas de même chez les animaux, et ce pour plusieurs raisons. Tout d'abord, un index spécifique à chaque espèce est nécessaire. En effet, selon les particularités digestives (enzymes, mastication, etc...) propres à une espèce, on ne peut pas forcément prévoir l'index d'un aliment à partir d'une mesure de l'index dans une autre espèce. Il est donc nécessaire de mesurer les index de chaque aliment pour une espèce donnée, ce qui est long et fastidieux, et souvent peu utile. En outre, le régime alimentaire des carnivores domestiques est très différent du nôtre : ils ne consomment généralement ni les mêmes aliments, ni les mêmes

quantités que les humains. La quasi-totalité des résultats obtenus chez l'homme, s'ils pouvaient être simplement extrapolés, ne seraient donc pas d'un grand intérêt.

Il n'existe pas, à ce jour et à notre connaissance, de mesures de l'index glycémique réalisées chez l'animal. Les expériences les plus proches ont été réalisées chez le chien en 1998 et 2001. Sans précisément mesurer un index glycémique, Nguyen *et al* ont déterminé en 1998 les réponses glycémiques et insulinémiques consécutives à l'ingestion d'aliments commerciaux [44], et ont démontré qu'un repas plus riche en fibres possède un effet bénéfique sur l'hyperglycémie post-prandiale. Hesta *et al.* ont confirmé ces résultats en 2001 [26].

La définition, telle qu'elle est proposée chez l'homme, n'est peut-être pas transposable directement à l'animal. En effet, si certains chiens de grande taille n'auraient aucune difficulté à ingérer un aliment contenant 50 grammes de glucides, la quantité est trop importante pour les chats et les petits chiens. Il n'existe pas de quantité bien définie pour chaque espèce, ni a fortiori pour chaque race.

Le principe reste cependant le même, à savoir comparer la réponse de la glycémie entre un aliment à tester et un aliment de référence. La quantité testée, nous l'avons dit, importe finalement peu puisqu'il s'agit d'une comparaison, le seul impératif étant de faire correspondre la quantité de glucides de l'aliment à tester et de l'aliment de référence.

Pour les animaux diabétiques, le bénéfice à attendre d'un aliment à faible index glycémique est encore plus important. Toute prise alimentaire entraîne une hausse de la glycémie. Dans le cas du diabète, pour contrebalancer cette hausse, des injections d'insuline à réaliser par le propriétaire sont nécessaires. Ceci constitue la base d'un traitement du diabète, en association avec une diminution pondérale si l'animal est obèse, et un régime spécifique. Actuellement, on recommande chez le chien de distribuer un régime riche en glucides complexes (amidon et fibres alimentaires pour 50 à 55% de l'énergie), sans sucres simples, avec peu de graisses (moins de 20% de l'énergie), et modéré en protéines (14 à 30% de l'énergie) [64]. On recherche, au moyen d'un tel aliment, à limiter l'hyperglycémie post-prandiale. Comme chez l'homme, un aliment à faible index glycémique entraîne une hausse de la glycémie plus modeste qu'un aliment à haut index glycémique. Il a été démontré qu'un aliment riche en fibres insolubles, donc théoriquement de faible index

glycémique, permet d'améliorer le contrôle de la glycémie chez le chien [31] [24] et chez le chat [43]. Une hausse modérée de la glycémie est plus facile à résorber avec de l'insuline. Quel que soit le type d'insuline utilisée, les doses nécessaires seront moins importantes, et donc les effets secondaires moins nombreux. Ainsi les risques d'hypoglycémie sont nettement diminués et le risque d'apparition d'une insulino-résistance est moins grand.

Le bénéfice d'un régime à faible index glycémique consiste, chez le chien, en une réduction des fructosamines, de l'hémoglobine glyquée, et des HDL et LDL (Low Density Lipoprotein), qui sont, pour les premiers, des marqueurs d'une hyperglycémie fréquente [24].

Ceci est vrai chez le chien, à cause de ses habitudes alimentaires (1 à 2 repas par jour), mais l'est beaucoup moins chez le chat qui prend de nombreux petits repas nuit et jour, parfois jusqu'à 20 au total. L'élévation de la glycémie est moindre après chaque repas en raison de la faible quantité ingérée [38]. Il n'est donc pas certain que l'alimentation d'un chat diabétique au moyen d'un aliment de faible index glycémique apporte une amélioration notable, et des expériences seront nécessaires pour déterminer si une telle alimentation présente un intérêt direct dans la gestion du diabète félin.

B) Index glycémique et obésité :

1) index glycémique et obésité chez l'homme :

L'obésité dans les pays développés prend de nos jours tous les aspects d'une épidémie, et représente l'un des plus grands dangers pour les systèmes de santé mondiaux dans un futur proche. Les pays en voie de développement sont à leur tour menacés, avec une augmentation de la prévalence très préoccupante.

L'obésité est la conséquence d'un bilan énergétique positif. Pour atteindre un équilibre pondéral, il est nécessaire d'équilibrer les apports énergétiques, donc la prise de nourriture, et les dépenses énergétiques, au cours de l'activité physique. Si les apports sont supérieurs aux dépenses, le bilan énergétique est positif.

L'étiologie de l'obésité est donc théoriquement simple, mais la réalité est beaucoup plus complexe. Si l'obésité présente une composante génétique, l'appétit et les choix comportementaux de mode de vie, de régime, etc..., influencent grandement son apparition. Cependant la clé de la prévention de l'obésité reste la diminution de la prise alimentaire et l'augmentation de l'activité physique.

Chez les personnes obèses, si elles ne sont pas diabétiques, les mesures de l'index glycémique sont comparables et proches des mesures effectuées chez des individus sans surcharge pondérale [66].

L'intérêt de l'index glycémique dans la prévention et la prise en charge de l'obésité a pour principale origine des études d'alimentation à court terme. Ces études ont recherché l'effet de l'index glycémique sur la sensation de faim, et sur la prise de nourriture qui y fait suite. Elles ont consisté à comparer un aliment simple à index glycémique faible avec un aliment à index glycémique élevé, ou modifié un aspect du régime en vue d'abaisser l'index glycémique de l'aliment. Ces études se déroulent surtout dans le cadre d'un repas unique.

Globalement, l'effet montré a été une réapparition plus rapide de la sensation de faim lors de la consommation d'aliments à fort index glycémique, alors que la satiété obtenue au cours du repas était équivalente. L'apport énergétique volontaire (action de se nourrir) est donc plus fréquent avec des aliments de fort index glycémique [52] [36].

D'autres études, plus rares, ont été menées à moyen terme. L'une d'elles a abouti à la conclusion qu'avec 5 semaines d'un régime alimentaire de faible index glycémique, on obtient une amélioration des profils lipidiques plasmatiques, ainsi qu'une réduction de la masse adipeuse sans pour autant diminuer le poids total. Cette étude concerne des hommes en surpoids modéré, non diabétiques [7].

Par ailleurs, les aliments de fort index glycémique favoriseraient la lipogénèse, et donc la prise de poids, ceci étant très sujet à caution et nécessitant de plus amples recherches [47].

Ces études sont toutes sujettes à controverses, du fait de la subjectivité des données, et, à l'heure actuelle, de nombreux débats et expériences sont toujours en cours pour déterminer si l'amélioration est réelle ou artificielle. Par exemple, l'effet de l'index glycémique dans le contexte d'un repas complet mériterait d'être envisagé.

Les effets au long terme d'une alimentation de faible index glycémique sont pour l'instant totalement inconnus et devraient rapidement être évalués, notamment afin de déceler d'éventuels effets indésirables. Des effets de « second repas », c'est à dire l'influence d'une consommation alimentaire précédant l'ingestion en cours, modèleraient la réponse glycémique, et tous les repas de bas index glycémique ne seraient pas équivalents en termes de régulation de la glycémie post-prandiale [5].

2) index glycémique et obésité chez le chien et le chat :

Il a été démontré que la consommation d'aliments à fort index glycémique induit une hypersécrétion d'insuline immédiate, et un dépôt adipeux plus important après 4 semaines chez le rat [48]. La sensibilité à l'insuline n'est pas affectée par un régime de ce type sur une telle période [48], c'est à dire sur une durée trop courte pour évaluer l'insulinorésistance éventuellement déclenchée par des aliments de fort index glycémique. Aucune étude n'a été entreprise à ce jour sur les carnivores domestiques sur ce sujet.

Comme chez l'homme, l'obésité des carnivores domestiques est en constante progression dans les pays industrialisés. Plus le rapport affectif avec l'animal est important, plus la nourriture risque d'être distribuée en quantité supérieure à la normale.

Bien que l'obésité de l'animal et celle de l'homme soient souvent comparées, beaucoup moins de corrélations obésité/maladies ont été établies chez les carnivores domestiques. Cependant, de nombreuses similitudes existent entre l'homme et le chien concernant les mécanismes moléculaires conduisant au développement de l'insulinorésistance et des dyslipidémies [45]. Les mécanismes généraux semblent similaires, et il apparaît donc raisonnable de penser que les résultats obtenus chez l'homme concernant l'index glycémique et l'obésité sont transposables chez le chien avec un minimum d'ajustements. Pour le chat, en

revanche, de nouvelles expériences seraient nécessaires car peu de données sont disponibles sur la fréquence et les mécanismes de l'obésité chez le chat [64].

Les principales pathologies résultant de l'obésité chez les animaux sont :

- l'arthrose, due à la surcharge pondérale exercée en particulier sur les hanches. C'est la pathologie la plus souvent reliée à l'obésité,
- des difficultés respiratoires, moins liées à la gêne due au poids qu'au rétrécissement des voies anatomiques,
- une plus forte prévalence des maladies infectieuses,
- des pathologies hépatiques telles que la lipidose, en particulier chez le chat,
- le syndrome urinaire félin (SUF), avec une relation de causalité énigmatique,
- et enfin, le diabète.

Cette liste n'est pas exhaustive, mais elle illustre les problèmes générés par un surpoids morbide chez les animaux.

Le traitement de l'obésité, c'est à dire la réduction de la masse corporelle, peut s'envisager de deux manières : soit par une augmentation de la dépense énergétique au moyen d'une reprise ou d'une augmentation de l'activité physique, soit par une réduction de l'apport énergétique.

Dans les deux cas, un examen clinique complet est un préalable indispensable, auquel il est souhaitable d'ajouter un bilan sanguin et biochimique permettant d'exclure toute autre cause sous-jacente d'obésité, comme un déséquilibre des hormones thyroïdiennes par exemple.

L'augmentation de la dépense énergétique est parfois impossible, dans le cas d'animaux appartenant à des personnes ne pouvant leur assurer un exercice physique suffisant, ou difficile chez le chat parfois peu enclin à l'exercice.

La réduction de l'apport énergétique peut être de deux types. On peut envisager le jeûne pur et simple, qui outre le fait d'être difficilement acceptable éthiquement et encore plus difficilement acceptable par les propriétaires, présente

des risques pour la santé de l'animal. En effet, pour un chat obèse, la lipidose hépatique est souvent provoquée par un jeûne, qui entraînera donc indirectement la mort de l'animal. On peut plus facilement envisager la mise en place d'un régime allégé ou « light », c'est à dire de moindre valeur énergétique. Le vétérinaire praticien est confronté très fréquemment à la mise en place d'un tel régime.

Les formulations allégées (« light ») contiennent en général simplement moins d'énergie disponible. Elles sont différentes des aliments diététiques pour animaux obèses, qui sont eux spécifiquement formulés pour permettre une nutrition correcte des animaux pendant une phase d'amaigrissement.

L'intérêt de la mesure des index glycémiques de ces aliments diététiques serait grand. En effet, il ne suffit pas qu'un aliment soit pauvre en lipides pour que son énergie disponible soit faible. Chez l'homme, un aliment à faible index glycémique entraîne une sensation de satiété plus importante et plus durable qu'un aliment à fort index glycémique [52]. Dans ce cas, la prise alimentaire suivante est moins importante, ou plus éloignée dans le temps. S'il en est de même chez les animaux, comme on peut le concevoir, cela contribuerait à diminuer les apports énergétiques, donc à participer plus activement au traitement contre l'obésité. La mention de l'index glycémique pourrait donc être une donnée intéressante ou même un argument de vente pour les aliments diététiques.

En définitive, il serait donc utile au praticien de connaître l'index glycémique des aliments qu'il prescrit dans le traitement de l'obésité et du diabète, surtout chez le chien en raison de ses habitudes alimentaires. Ceci serait une donnée intéressante pour mieux évaluer le bénéfice à attendre d'un régime diététique.

En ce qui concerne les rations ménagères, les règles alimentaires de base pour constituer un régime équilibré priment sur le reste. De plus, il est inutile de mesurer l'index glycémique d'une ration préparée à la maison, car le propriétaire ne peut pas standardiser sa procédure de fabrication. D'une journée à l'autre, l'index glycémique du repas risque donc de varier. Cependant, si cela est possible, il serait souhaitable de constituer ce régime avec des matières premières ayant un faible index glycémique, en privilégiant par exemple le riz complet par rapport au riz blanc, etc... Le bénéfice à retirer d'une alimentation constituée de cette manière est incertain,

puisque non mesurable ; mais si un tel aliment était facilement réalisable en pratique, et compatible avec une bonne gestion du diabète, il n'existerait aucune contre-indication à sa réalisation.

C) autres maladies :

L'index glycémique possède des applications biologiques diverses, et il peut s'avérer intéressant d'étudier son action dans d'autres domaines que la gestion de l'obésité et du diabète. Revenons au principe de base : un aliment à faible index glycémique entraîne une hausse de la glycémie moins importante, mais plus durable qu'un aliment à fort index glycémique. Inversement, un aliment à fort index glycémique entraîne une hausse de la glycémie importante, pendant une période plus courte.

Chez un chat sain et correctement nourri, la néoglucogenèse fonctionne en permanence au maximum des capacités enzymatiques de l'organisme. Elle ne peut donc pas augmenter quand le chat est soumis à un stress. Cependant, l'hyperglycémie est fréquente lors du stress, provoquée par une résistance à l'insuline due à une augmentation du glucagon circulant et des corticostéroïdes. Dans le cas d'un chat hospitalisé, stressé à la fois par cette hospitalisation et par sa maladie, l'objectif nutritionnel devra être d'assurer un apport énergétique suffisant, tout en évitant d'aggraver l'hyperglycémie déjà existante. Les aliments à bas index glycémique seraient donc une indication particulièrement intéressante dans ce cas. En effet, ils permettent d'apporter la quantité d'énergie nécessaire à l'animal, mais sur une période plus longue. La glycémie, déjà haute, augmentera moins brutalement et dans des proportions plus restreintes. Ceci permettrait, dans une certaine mesure, de limiter les effets du stress sur le métabolisme énergétique du chat hospitalisé.

Tout chat hospitalisé pourrait donc être nourri, par prise spontanée si son état de santé le permet, avec des aliments à bas index glycémique. En cas de nutrition entérale assistée, par contre, l'indication paraît moins évidente. En effet, les aliments

à bas index glycémique, du fait de leur teneur élevée en fibres notamment, sont en général plus visqueux et moins digestibles que les autres. Ceci pourrait nuire à l'écoulement de l'aliment dans la sonde, l'obstruer ou favoriser l'adhésion et la stagnation des aliments sur ses parois, etc... Les aliments spécifiquement conçus pour une nutrition entérale sont plus appropriés, mais peut-être sera-t-il possible de développer un aliment de faible index glycémique adapté à cette indication, si son intérêt réel est démontré.

Les aliments de faible index glycémique sont donc adaptés aux cas où l'on veut assurer un apport énergétique plus étalé, s'inscrivant dans la durée. Chaque indication relève du jugement du praticien en fonction des spécificités de l'animal et de sa pathologie.

Faut-il alors bannir les aliments à haut index glycémique de l'alimentation des carnivores domestiques ? Ces aliments ne sont pas nocifs, et certaines de leurs caractéristiques peuvent s'avérer utiles et compatibles avec une pratique quotidienne de la médecine vétérinaire.

L'entéropathie chronique du gros intestin par prolifération bactérienne est une affection relativement fréquente en médecine vétérinaire. La cause de cette prolifération est en général inconnue, même si une stase intestinale en est fréquemment un facteur déterminant. La prolifération bactérienne se manifeste classiquement, chez le jeune chien, par une diarrhée chronique intermittente, parfois accompagnée d'une perte de poids ou d'un arrêt de croissance. Cette prolifération, qui atteint en général tout le colon et parfois l'intestin grêle, nécessite un traitement approprié à base d'antibiotiques, guidé idéalement par un antibiogramme. En effet, la présence d'une population bactérienne anormale dans l'intestin grêle interfère avec le processus de digestion, et spolie l'organisme de nutriments, les bactéries les détournant à leur profit. Une compétition pour l'absorption des nutriments, tout particulièrement les glucides, apparaît entre les cellules des villosités intestinales et les bactéries.

Or, un aliment à haut index glycémique présente des glucides rapidement disponibles, rapidement absorbés, donc moins accessibles aux bactéries, ce qui rend leur milieu moins propice à leur développement. Des études ont montré que

lorsqu'on donne du riz (de fort index glycémique) à un chien au lieu de céréales (de plus faible index glycémique) incorporées dans les aliments du commerce, la digestibilité des glucides est augmentée [60]. Ces glucides, qui ne peuvent être digérés par le chien lui-même, sont parfois fermentés par la population bactérienne qui acquiert ainsi des nutriments. L'administration d'un aliment de fort index glycémique entraîne donc une mise à disposition moins importante de fibres utilisables par les bactéries. Ceci n'est pas encore validé par des expériences, mais mériterait de faire l'objet d'une étude. Les aliments de haut index glycémique pourraient ainsi être indiqués en parallèle à un traitement antibiotique approprié, et aider à améliorer l'état de santé d'un animal souffrant d'entéropathie chronique.

Pour les mêmes raisons, après une entérectomie de l'intestin grêle relativement importante, la surface d'absorption est réduite par rapport à un animal normal et un aliment possédant une énergie rapidement assimilable, à haut index glycémique, semble plus indiqué.

Dans le domaine de la nutrition spécifique, pour un animal sportif réalisant des efforts brefs mais intenses, comme un chien d'agility ou un lévrier de course, il serait intéressant de distribuer entre une demi-heure et trois-quarts d'heure avant le départ de l'épreuve un aliment à fort index glycémique, afin d'apporter une grande quantité d'énergie disponible sur une période courte. Par contre, pour un chien réalisant des efforts soutenus dans le temps, comme un chien de chasse, il semble plus indiqué de distribuer un aliment de faible index glycémique afin d'assurer un apport énergétique de longue durée.

Des résultats obtenus chez l'homme indiquent que les sportifs pratiquant des disciplines basées sur l'endurance retirent un plus grand bénéfice de la consommation d'aliments de faible index glycémique [61].

En résumé, les aliments à fort index glycémique pourraient présenter un intérêt lorsqu'on recherche une absorption des glucides brève et importante, pour un animal de sport, comme pour des animaux atteints de pathologies diminuant l'absorption intestinale .

Ainsi, connaissant l'index glycémique d'un aliment, le vétérinaire praticien pourrait bénéficier d'une donnée simple se traduisant concrètement au niveau biologique. En fonction de l'effet recherché, il pourrait conseiller un type d'aliment adapté à chaque cas, en tenant compte des autres propriétés de l'aliment. Il serait possible par exemple de développer une gamme d'aliments avec plusieurs valeurs d'index glycémique. On peut imaginer un aliment ayant un bas index glycémique contenant peu de protéines mais des protéines de bonne qualité pour un chat insuffisant rénal hospitalisé ; ou bien le même aliment cette fois-ci de haut index glycémique pour un autre chat insuffisant rénal, mais atteint d'une entéropathie bactérienne. Sans aller jusqu'à une spécialisation de ce type, coûteuse, la connaissance de l'index glycémique d'un aliment composé permettrait de guider la prescription vétérinaire, particulièrement en ce qui concerne les aliments diététiques prescrits dans le diabète et l'obésité.

III^{ème} partie

Discussion

A) Considérations méthodologiques :

La liste des points à standardiser pour pouvoir valider les mesures d'index glycémique est longue. A ce jour, aucune norme ne s'est véritablement imposée, même si des recommandations précises ont été formulés par la FAO [17]. Les tests reposent sur des conditions opératoires décidées empiriquement ou en fonction d'impératifs matériels. Cela implique qu'ils ne sont pas comparables entre eux, et les interprétations doivent alors être réalisées avec précaution. Examinons à présent les principaux points critiques de la méthode.

1) Facteurs pré-analytiques :

1.1) Facteurs de variation inhérents à l'aliment :

La nature physico-chimique de l'aliment va être déterminante à deux niveaux principaux lors de la digestion : elle conditionne en grande partie le temps de vidange gastrique, et influe ensuite sur les contacts enzymes/substrat et nutriments/muqueuse intestinale. Le temps de vidange gastrique est plus influencé par la nature physique des aliments, et les contacts nécessaires à la digestion dans l'intestin grêle sont plus influencés par la nature chimique de l'aliment.

◆ **Nature physique de l'aliment**

Les principaux facteurs physiques influençant le temps de vidange gastrique sont la température et la cohésion de l'aliment. En effet, la mastication a pour but de morceler les aliments et de permettre une meilleure efficacité des enzymes de l'estomac. Ainsi, plus l'aliment est broyé et amené à une température proche de celle de l'organisme, plus le temps de vidange gastrique sera bref. Les aliments « natifs »,

comme le pain intégral réalisé à partir d'une farine grossière, et dont les molécules sont physiquement moins accessibles du fait de l'intégrité des cellules végétales et du rôle de barrière de la paroi, ont tendance à avoir un index glycémique plus faible. Les aliments déjà très transformés ou raffinés, comme les céréales soufflées par exemple, dont les molécules sont très disponibles et peu protégées, ont un index glycémique plus élevé.

La cuisson des aliments influe directement sur les fibres en les dénaturant, ce qui les rend généralement plus accessibles aux enzymes donc plus digestibles. Un aliment très cuit aura par conséquent un index glycémique plus important que le même aliment peu cuit, du fait de l'hydrolyse préalable des fibres [32].

Enfin, la dilution de l'aliment est possible, ce qui signifie que l'on peut proposer de l'eau aux animaux lors des tests, puisqu'il a été prouvé qu'une dilution ne modifie pas significativement l'aire sous la courbe [54], du moins chez le chien.

◆ **Nature chimique de l'aliment**

Dans l'intestin grêle, l'absorption des glucides peut être ralentie par les lipides. En effet, à cause de leur rôle de « protecteur stérique », ils gênent d'abord le contact entre la partie glucidique des aliments et les enzymes glucido-lytiques, puis le contact entre les molécules assimilables et la muqueuse intestinale, retardant ainsi l'arrivée de celles-ci dans le sang. L'émulsion de ces lipides est un préalable à l'absorption des glucides. Un aliment riche en lipides aura ainsi tendance à avoir un index glycémique peu élevé.

Les protéines, selon leur nature et leur quantité, influencent de manière variable l'index glycémique d'un aliment. Cependant, plus un aliment est riche en protéines, plus son index glycémique a tendance à baisser, ceci étant vraisemblablement dû au fait que les protéines, comme les lipides, retardent le contact entre les polymères de glucides et les enzymes, puis entre les monomères et la muqueuse.

Un des principaux facteurs chimiques modifiant les contacts enzyme/substrat et nutriment/muqueuse digestive est la richesse de l'aliment en fibres alimentaires. Cette propriété de l'aliment exerce aussi un effet notable sur le temps de vidange gastrique. Les fibres sont généralement classées en deux catégories : les fibres solubles et les fibres insolubles.

Les fibres insolubles, comme le son de céréales ou la cellulose, ont des effets plus ou moins marqués sur le temps de vidange gastrique, selon la source alimentaire et la quantité ingérée.

Les fibres solubles, comme la gomme de guar ou la carboxy méthyl cellulose ralentissent systématiquement la vidange gastrique du fait de leur effet gélifiant lorsqu'elles sont déjà présentes dans un aliment. En revanche, il n'est pas prouvé qu'elles aient le même effet lorsqu'elles sont rajoutées au bol alimentaire dans l'estomac. On peut penser que la manière dont une substance s'hydrate dans le tractus digestif, ainsi que sa viscosité, modifient ses propriétés physiologiques. C'est sans doute pour cela que de nombreuses études contradictoires sur la gomme de guar ne peuvent aboutir à prouver son efficacité dans la réduction de l'index glycémique: selon le taux d'hydratation de cet extrait végétal, son addition provoque des résultats variables.

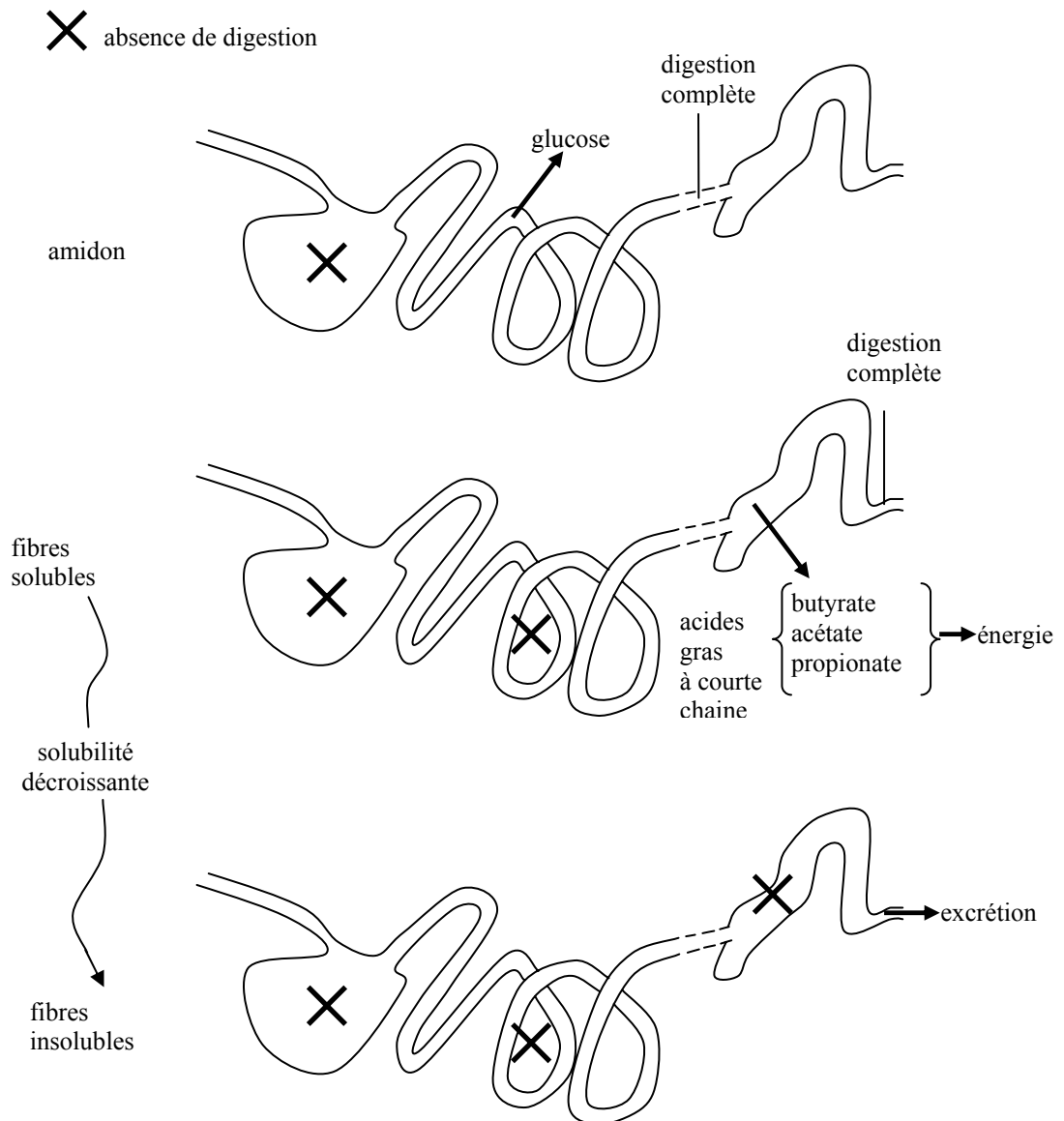


Figure 4 : Représentation schématique des sites de digestion des glucides complexes dans le tractus gastro-intestinal du chien.

La figure 4 présente le devenir des fibres alimentaires au cours de la digestion en fonction de leurs propriétés physico-chimiques, leur nature et leur solubilité. Ceci illustre le fait que les fibres ne sont pas toutes assimilables immédiatement et que leur absorption peut se produire de manière retardée. La part d'énergie récupérée par l'animal au moyen des acides gras volatils est totalement inconnue.

Ainsi, selon le caractère soluble ou non des fibres, mais aussi selon leur fermentescibilité, l'énergie contenue dans un aliment n'est ni entièrement, ni immédiatement disponible. L'index glycémique permet de compléter l'analyse brute, puisqu'il permet de savoir si, globalement, les glucides sont très disponibles ou peu disponibles indépendamment de la nature des fibres.

En définitive, qu'elles soient solubles ou insolubles, les fibres alimentaires ont tendance à diminuer l'index glycémique, ainsi que le démontrent certaines études [27], mais il est difficile de quantifier cette baisse.

Une autre interrogation porte sur la disponibilité des glucides, quelle que soit leur quantité. Puisque l'index glycémique est un index mesurant le potentiel d'augmentation de la glycémie provoquée par un aliment, on ne devrait pas inclure dans les 50 grammes les glucides non absorbables dans l'intestin grêle. Ceci s'avère complexe à déterminer du fait des variations entre les méthodes de mesure dans le monde. En pratique, les glucides disponibles sont généralement calculés comme les carbohydrates totaux auxquels on retranche les TDF (Total Dietary Fibers), selon la méthode de l'Association of Official Analytical Chemists (AOAC) [41]. Dans la majorité des cas, il s'agit d'une bonne approximation, mais ce n'est pas parfaitement exact. Une autre méthode de détermination des glucides disponibles se base sur l'ENA (Extractif Non Azoté), qui représente les sucres solubles et les substances plus complexes d'un aliment qui libèrent des sucres au cours de la digestion. L'ENA est calculé, et correspond à la valeur 100 à laquelle on soustrait les pourcentages d'eau, de protéines, de matières grasses, de cellulose brute et de cendres brutes. L'ENA ainsi estimé supporte toutes les erreurs d'évaluation des autres composants alimentaires, tout particulièrement liées à la méthode de Weende pour le dosage des glucides membranaires. Cette méthode fait passer dans l'ENA la totalité des substances pectiques, près de la moitié des hémicelluloses, un tiers de la lignine, etc. L'ENA ne caractérise donc pas non plus parfaitement les glucides absorbables dans l'intestin grêle. La méthode de détermination des fibres indigestibles nécessiterait d'être standardisée au niveau international afin de pouvoir comparer les résultats d'une étude à l'autre.

La seule connaissance de la composition chimique d'un aliment ne remplace donc pas la mesure de son index glycémique. Selon la composition précise d'un aliment, et surtout en fonction des proportions des différents constituants, l'index glycémique peut varier notablement. S'il est possible de prévoir dans les grandes lignes la valeur de l'index glycémique d'un aliment (plutôt fort ou plutôt faible), il n'est pas possible de comparer deux aliments, par exemple deux aliments riches en fibres, sur la seule base de leur composition chimique.

◆ **Quels aliments tester ?**

Comme chez l'homme, il serait possible de tester différentes matières premières. Cependant, selon le mode de préparation des aliments, l'index glycémique varie. Il est faux de dire que le riz a un index glycémique fixé, puisque cet index augmente avec le temps de cuisson. En cela, l'alimentation des carnivores domestiques possède un aspect pratique non reproductible dans l'alimentation humaine : dans la majorité des cas, les aliments distribués sont fabriqués industriellement, donc de manière standardisée. Les aliments produits sont les mêmes, avec un index glycémique identique au cours du temps si les matières premières et le mode de fabrication ne varient pas. On peut ainsi alimenter un carnivore tout au long de sa vie en maîtrisant l'index glycémique de sa ration, ce qui n'est pas réalisable chez l'homme qui change d'aliment.

C'est pourquoi il serait intéressant de mesurer l'index glycémique des aliments industriels à visée diététique. De nombreux aliments de ce type sont déjà disponibles dans le commerce, avec des teneurs réduites en lipides, des protéines de meilleure qualité, etc... Ils doivent répondre à des critères précis détaillés dans le décret 99-277 du 7 avril 1999, concernant leur « composition particulière » et aussi en ce qui concerne leur valeur énergétique, comme stipulé dans l'arrêté du 8 avril 1999 pour pouvoir bénéficier de la dénomination « aliments diététiques ». Il serait intéressant, compte tenu des propriétés des aliments de faible index glycémique vis à vis de la santé animale, que les fabricants d'aliments soient tenus d'indiquer sur leur produit son index glycémique. Ceci pourrait devenir un objectif nutritionnel particulier des carnivores domestiques, au minimum en ce qui concerne l'obésité et le diabète, et le législateur pourrait modifier l'arrêté du 8 avril 1999 en ce sens.

1.2) Facteurs de variation inhérents à l'animal :

◆ **Influence de l'aliment de référence**

L'aliment de référence se voit arbitrairement assigné un index glycémique de 100. Le pain blanc et le glucose ont tous deux été utilisés comme aliments de référence, et les résultats obtenus peuvent être convertis d'un système à l'autre en multipliant les valeurs de l'index établi au moyen du pain par un facteur 1,4. Ceci est dû au fait que le glucose possède une réponse glycémique 40% plus importante que le pain. Afin de standardiser les mesures, il serait souhaitable de privilégier le glucose comme aliment de référence. En effet, selon la cuisson, ou encore selon la nature de la farine utilisée, les glucides du pain peuvent être plus ou moins rapidement digérés puis assimilés par l'organisme, que ce soit chez l'homme ou chez l'animal [14]. Les tablettes de glucose ne possèdent pas cette variabilité, et sont équivalentes quels que soient les tests.

◆ **Influence de la vitesse d'ingestion**

S'il est possible de demander à une personne d'ingérer un aliment dans un délai bref, il est en revanche beaucoup plus difficile de le faire comprendre à un animal, surtout un chat. Le jeûne de 12 heures précédant les expériences permet de résoudre en partie ce problème : un animal ayant faim finira plus rapidement l'aliment qui lui est présenté. Ceci dépend de la quantité et de l'appétence de l'aliment. La mastication influera aussi sur la nature physique de l'aliment ce qui, comme nous l'avons vu, influence grandement le temps de vidange gastrique et les modalités des différents contacts dans l'intestin grêle, et sur sa nature chimique puisque l'aliment se trouve imprégné de salive. Le chien ne mastique en général que peu ses aliments, mais ceci peut cependant constituer une source importante de variation.

Compte tenu de ces particularités, la mesure de l'index glycémique apparaît plus intéressante sur les aliments commerciaux, qui possèdent une structure physique constante d'un paquet à un autre. Un animal mâchera à peu près de la même manière cet aliment à chaque repas.

◆ Avec quelle quantité de glucides effectuer les expériences ?

La quantité d'aliment à tester, 50 grammes, a vraisemblablement été déterminée empiriquement chez l'homme. Peut-être s'agit-il d'un pourcentage des apports journaliers recommandés, qui préconisent en moyenne environ 200 grammes de glucides simples et complexes par jour. Les expériences menées avec le quart de cette valeur ayant donné des résultats satisfaisants, elle aurait par la suite été gardée. Ceci n'est cependant qu'une hypothèse.

La variabilité de la réponse de différents sujets soumis à des mesures de l'index glycémique pourrait provenir de leur régime alimentaire. Ainsi, des personnes habituées à des régimes riches en glucides complexes pourraient posséder une activité amylasique supérieure, ce qui modifierait les résultats. En réalité, chez l'homme, quel que soit le régime alimentaire distribué au préalable, 50 grammes de glucides représentent une quantité très faible, et même une personne ne consommant pas régulièrement des glucides complexes est apte à digérer un aliment de ce genre.

50 grammes de glucides représentent en revanche une quantité trop importante pour un chat ou un petit chien. Si l'on s'en tient à un simple rapport de poids entre l'homme et le chat, on constate qu'il faudrait approximativement distribuer une quantité de trois grammes de glucides. L'activité amylasique dans le chyme intestinal du chien est dépendante de la richesse en amidon des aliments consommés, et est multipliée par 6 lors de l'ingestion d'un aliment riche en amidon. Par contre, l'activité amylasique de base du chat est 4 à 5 fois moins importante que celle du chien et n'augmente que d'un facteur 2 lors de la consommation d'un aliment riche en amidon [30].

Les taux d'incorporation maximale des glucides dans la ration à l'entretien du chien et du chat varient donc considérablement entre les deux espèces. Il n'est pas possible d'incorporer plus de 5% de la matière sèche en sucre simple chez le chat, et pas plus de 25% d'amidons de mélange (40% chez le chien). Un chat peut donc ingérer approximativement 5 grammes d'amidon par kilo de poids vif, ce qui donne pour un chat moyen de 4 kilos, 20 grammes d'amidon au maximum [39]. La

détermination d'une quantité de référence chez le chat devra donc tenir compte de ces particularités.

Il n'y a, en revanche, pas d'adaptation en dehors des repas de l'activité amylasique chez le chien, à court terme. Des animaux nourris pendant 8 jours avec un régime riche en carbohydrates ne présentent pas de modification de leur activité enzymatique en dehors des repas [37]. Le chat ne semble pas non plus présenter d'adaptation à court terme en fonction de son régime alimentaire. Les effets au long terme d'un tel régime ne sont pas connus.

◆ **Influence de l'heure du prélèvement :**

En théorie, la mesure de l'index glycémique pourrait être effectuée à n'importe quel moment de la journée. En pratique, l'augmentation de la glycémie est maximale le matin, après 10 à 12 heures de jeûne chez l'homme [41]. Puisque l'influence du précédent repas en terme d'induction enzymatique chez le chien est négligeable à court terme [37], il apparaît souhaitable de pratiquer également les prélèvements le matin, après une nuit de jeûne, l'utilité d'un jeûne plus long ne paraissant pas évidente. En ce qui concerne le chat, il est légitime de supposer que les mesures doivent être réalisées dans les mêmes conditions.

Cette période de jeûne avant les mesures semble nécessaire : en effet, une consommation une heure avant le début des test d'un aliment ou de 10 grammes de fructose modifie profondément les résultats obtenus ensuite, réduisant d'environ 25% les index glycémiques d'aliments déjà connus [25]. Comme nous l'avons vu, ce jeûne permet aussi de s'assurer que l'animal consommera plus volontiers l'aliment qui lui est proposé.

◆ **Rôle du temps de vidange gastrique :**

L'estomac se vide plus ou moins rapidement selon la nature physico-chimique des aliments. Pour de l'eau tiède, la vidange est instantanée, mais pour les autres aliments, elle peut être très retardée. Le temps de vidange gastrique induit une arrivée étalée des nutriments dans l'intestin grêle, en évitant les à-coups, ce qui

permet d'assurer l'étalement des apports en glucides à l'organisme sur plusieurs heures. Selon le temps de vidange gastrique d'un aliment, il génèrera un pic de glycémie plus ou moins accentué. Il a été établi pour le pain que l'augmentation artificielle du temps de vidange gastrique abaisse l'index glycémique [13]. Le temps de vidange gastrique dépend plus de la nature physico-chimique de l'aliment que de l'animal lui-même.

◆ **Influence de la flore bactérienne commensale**

La flore bactérienne présente dans l'intestin grêle prélève aussi une part des nutriments ingérés par l'animal. Ce prélèvement est relativement constant, sauf si la population bactérienne est anormalement augmentée. Il convient donc de s'assurer que les animaux prévus pour les tests ne présentent aucun trouble digestif, en particulier une prolifération de la flore bactérienne.

◆ **Rôle de la circulation sanguine**

La circulation sanguine permet le transit du glucose depuis l'intestin grêle jusqu'aux organes. En premier lieu, la circulation portale assure le transport des glucides jusqu'au foie, où ils seront transformés en glucose, consommés ou éventuellement stockés. Si cette circulation portale diminue, l'index glycémique diminuera aussi artificiellement. Or l'exercice physique peut notablement diminuer la circulation portale. Il convient de s'assurer que les animaux ne peuvent pas faire d'effort particulier lors des expériences.

Concernant les glucides qui arrivent au foie, une part relativement constante est consommée par les cellules hépatique. Par contre le stockage des glucides peut augmenter si l'animal a besoin de reconstituer des réserves de glycogène trop sollicitées par un jeûne important. Pour cette raison, il n'apparaît pas souhaitable d'allonger la période de jeûne au delà de 12 heures

La méthode de prélèvement de choix chez l'homme est le prélèvement de sang total capillaire, et ce pour plusieurs raisons. Tout d'abord, les résultats obtenus

présentent une moins grande variabilité que ceux obtenus avec du plasma veineux [66]. Ensuite, l'augmentation de la glycémie sur ce type de sang est plus importante, ce qui conduit à des résultats statistiquement plus fiables [41]. Ces deux résultats s'expliquent par le fait que le sang veineux a déjà transité par les organes, qui sont d'importants consommateurs de glucose. Le sang capillaire est plus riche en glucose que le sang veineux. Enfin, il est plus simple à obtenir en pratique, et l'analyse immédiate de l'échantillon élimine les risques d'erreurs liées au vieillissement de l'échantillon. Ces résultats ne sont pas confirmés chez l'animal, mais rien n'indique qu'ils puissent être différents.

Idéalement, la mesure du sang portal permettrait en pratique d'obtenir la mesure la plus précise de la glycémie, et donc permettrait de caractériser au mieux la quantité de glucides disponibles dans un aliment. Cependant l'intérêt de la mesure de l'index glycémique est de permettre de mesurer la réponse intégrée de l'organisme, notamment les transformations hépatiques des autres glucides en glucose. Si l'on respecte de bonnes conditions opératoires, c'est à dire une période de jeûne ni trop courte ni trop longue, des animaux n'ayant pas la possibilité d'effectuer une activité physique, et des prélèvements de sang capillaire, on réduit efficacement les facteurs de variations biologiques qui deviennent relativement constants d'une expérience à l'autre.

1.3) Bilan sur la variabilité intra- et inter-individuelle

◆ **Variabilité intra-individuelle**

D'un jour à l'autre et même en ayant ingéré strictement le même aliment, les courbes de glycémie ne sont pas strictement identiques chez le même individu ou le même animal. Des études menées sur des chiens diabétiques prouvent qu'il existe une grande variabilité journalière des courbes de glycémie [18], le coefficient de variation atteignant parfois 50%. Des études similaires chez la femme en bonne santé [42] conduisent au même résultat. Il ne fait quasiment aucun doute que ceci est vrai quel que soit l'espèce et le statut physiologique du sujet testé.

La mesure de l'index glycémique prend en compte la glycémie à jeun du sujet test en ne calculant que l'aire supérieure à ce niveau de base. La glycémie à jeun est considérée comme un « bruit de fond », et le calcul de l'index glycémique ne se base que sur l'augmentation de la glycémie consécutive à l'ingestion de l'aliment à tester [41]. Ceci réduit de manière notable la variation intra-individuelle [21], qui devient de l'ordre de 20%. Cependant cette variabilité reste l'une des plus importantes sources d'erreurs dans le processus de mesure de l'index glycémique. Afin de tenter de réduire ces erreurs, il est recommandé d'effectuer les analyses pour un aliment donné trois fois chez chaque sujet [21] [65]. De cette manière, la variation intra-individuelle devient inférieure à 10%. Il paraît sensé d'adopter la même démarche pour la mesure de l'index glycémique chez les animaux.

A cause de cette variété intra-individuelle, donner une valeur chiffrée précise de l'index glycémique d'un aliment ne présente quasiment aucun intérêt. D'autres expériences sur les mêmes individus avec des conditions opératoires légèrement différentes (plus tard dans la journée par exemple) peuvent prouver que cette valeur est légèrement différente. Classifier les aliment en catégories de faible, moyen et fort index glycémique est plus intéressant. En effet, à moins que les deux aliments choisis n'aient un index glycémique très proche, toutes les expériences pourront confirmer leur différence d'index glycémique. La notion d'index, c'est à dire la classification des aliments, reprend le dessus par rapport à la valeur numérique de l'index. Si l'on veut prouver qu'un nouvel aliment a un index glycémique plus bas

qu'un aliment connu, il faudra dans une même expérience mesurer l'index des deux aliments. Ainsi, l'index glycémique est un outil puissant mais compliqué à déterminer : une nouvelle mesure est requise pour toute comparaison. Bien sûr, l'idéal serait le respect parfait des normes conseillées par la FAO, mais même avec de petites variations de procédure, l'index glycémique est un outil suffisamment fiable pour pouvoir être utilisé, avec les restrictions précédemment indiquées.

◆ Variabilité inter-individuelle

Actuellement on estime que l'âge, le sexe, l'indice de masse corporelle (reflet de l'état d'embonpoint d'un individu) et l'appartenance à une ethnie n'ont pas d'effet significatif sur l'index glycémique chez l'homme [66]. La plupart des variations d'index glycémiques proviennent en fait des variations intra-individuelles.

Qu'en est-il pour les animaux ? Il semble improbable que des mesures de glycémie effectuées sur un chien nain et sur un chien de grande taille soient équivalentes, et en parallèle se pose le problème de la dose à administrer. Il conviendrait dans un premier temps d'étudier sur au moins trois formats canins différents (grand – moyen – petit) l'index glycémique d'un aliment, avec pour chaque format une quantité de glucides définie arbitrairement, pour déterminer si les mesures sont comparables entre elles. De plus, si l'on effectue les expériences avec une quantité variable d'aliments pour s'adapter aux capacités digestives selon les tailles, les résultats ne sont pas non plus comparables entre eux.

Les variations inter-individuelles ne constituent pas une source d'erreurs majeures pour les humains, mais pourraient s'avérer beaucoup plus importantes chez le chien. Par contre, chez le chat, les différences de format étant beaucoup moins importantes, on peut supposer que les variations inter-individuelles sont beaucoup plus réduites et ne représentent pas une source d'erreurs significatives.

Un autre problème se pose lors de la détermination de l'index glycémique chez les animaux sains par rapport aux animaux diabétiques. Nous l'avons vu chez l'homme, même si le classement des aliments reste le même pour les deux types de population, la glycémie d'un individu diabétique n'est pas soumise à la même

régulation que celle d'une personne normale. Chez l'individu sain, la glycémie fluctue dans des limites restreintes, du fait de la régulation hormonale. La détermination de l'index glycémique est donc moins précise, du fait d'un « tassement » des valeurs obtenues.

Ceci s'avère plus simple à gérer pour les animaux : si l'on se contente de déterminer l'index glycémique des aliments diététiques, il suffit de mesurer sur des animaux diabétiques l'index glycémique des aliments qui leur sont destinés. Si l'on souhaite envisager les aliments diététiques dans leur ensemble chez les animaux diabétiques, il faut soit renouveler toutes les mesures d'index glycémique pour les animaux diabétiques, soit prouver que les index glycémiques des animaux sains et diabétiques sont corrélés, comme chez l'homme, ce qui est une solution pratiquement et éthiquement beaucoup plus acceptable.

2) Facteurs Analytiques :

La méthode de référence pour le dosage de la glycémie est le dosage colorimétrique du plasma veineux. Elle est pourtant moins souvent utilisée en pratique chez l'homme lors des mesures de l'index glycémique que le dosage par analyseur portable du sang capillaire.

En ce qui concerne les animaux, il semble aussi judicieux de privilégier ce type d'analyse. En effet, les analyseurs portables utilisant du sang capillaire sont jugés acceptables pour une utilisation clinique chez le chat et sont suffisamment précis pour pouvoir être utilisés pour mesurer l'index glycémique [62]. Quelle que soit la méthode de détermination utilisée, les variations d'une analyse à l'autre imputables à la méthode analytique sont infimes en comparaison des autres sources de variation.

Une méthode de mesure optimale chez les animaux semblerait être obtenue grâce aux systèmes de mesure continue de la glycémie interstitielle. Ces appareils nécessitent la pose d'une sonde dans le tissu sous-cutané, sans avoir besoin de recourir à une anesthésie, et permettent une lecture continue de la glycémie. Le

glucose interstitiel passe au travers d'une membrane semi-perméable et réagit avec l'enzyme glucose oxydase, qui transforme le glucose en acide gluconique et peroxyde d'hydrogène. Cette réaction génère un signal électrique proportionnel à la concentration de glucose, qui est enregistré par le système et converti en une concentration de glucose interstitiel en milligrammes par décilitre. La glycémie peut ainsi être suivie pendant une longue période.

Ce dispositif diminue le traumatisme consécutif aux prélèvements répétés chez les animaux, et permet d'éviter une hyperglycémie liée au stress en particulier chez le chat. La continuité des mesures permet aussi une plus grande précision de la courbe de glycémie. De plus, le dosage est effectué instantanément, ce qui empêche les erreurs pouvant provenir du vieillissement de l'échantillon. De tels dispositifs sont jugés fiables chez le chien et le chat [63]. Il conviendrait de déterminer si leur usage est compatible avec la mesure de l'index glycémique.

3) Traitement des résultats :

L'interprétation des résultats est fondée sur l'analyse de la courbe de glycémie. La méthode de calcul de l'aire sous la courbe n'est pas notre propos, mais il convient cependant de s'intéresser à certains aspects de ce calcul.

◆ Considérations sur la pertinence des aires sous la courbe

Il est légitime de se demander si l'aire sous la courbe, qui est un total, est le reflet parfait de l'élévation de la glycémie post-prandiale.

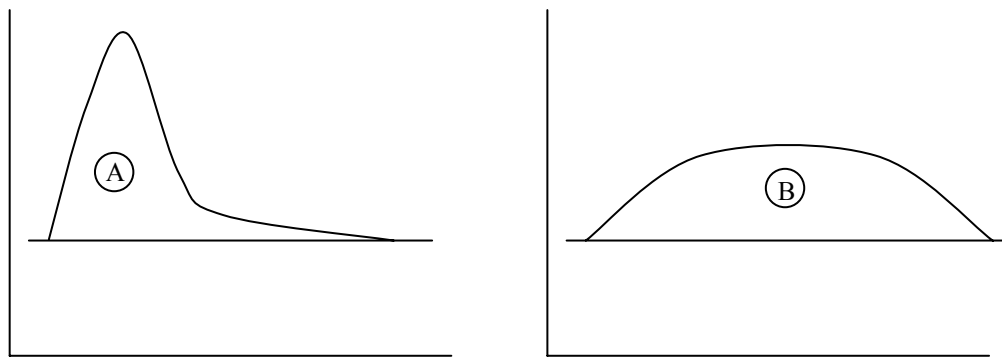


Figure 5 : Représentation schématique de deux courbes de glycémie supposées d'aire égale.

Si l'on suppose que l'aire A et l'aire B sont égales, cela signifie que l'aliment consommé dans l'expérience A et l'aliment consommé dans l'expérience B ont le même index glycémique. Or, on remarque que les répercussions en termes de glycémie sont très différentes pour les deux aliments. L'index glycémique décrirait-il de manière erronée la réalité ?

De manière plus générale, puisqu'un aliment de fort index glycémique produit, par définition, une plus grande aire sous la courbe, peut-on affirmer qu'il produit aussi un plus important pic de glycémie ?

Pour répondre à ces questions, il convient de garder à l'esprit la réalité biologique traduite par ces courbes : ni la courbe A, ni la courbe B n'existent dans la réalité.

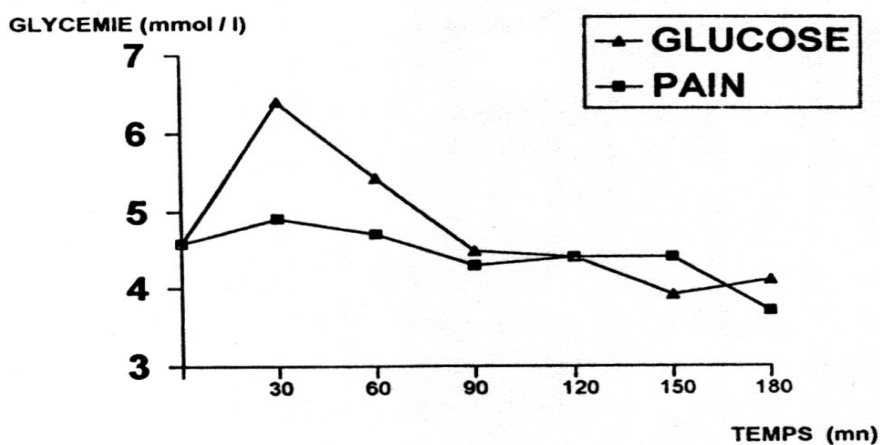


Figure 6 : Courbes de glycémie obtenues après ingestion de glucose et de pain (d'après [6]).

Une courbe de glycémie est le reflet de la concentration sanguine en glucose au cours du temps. Après ingestion d'un aliment, cette courbe prend une valeur plus élevée, puis revient à son niveau de base au bout d'un certain temps. L'aliment pour lequel cette hausse est maximale est le glucose, puisqu'il n'a pas besoin d'être digéré avant d'être assimilé. L'insuline, qui fait décroître la courbe, est sécrétée en réponse à l'élévation de la glycémie sanguine.

Le glucose qui entraîne donc une réponse maximale de la sécrétion d'insuline est aussi l'aliment susceptible de faire décroître le plus fortement la courbe après le pic. Or, une courbe de glycémie obtenue après l'ingestion de glucose ne ressemble pas à la courbe A. Le pic est beaucoup moins prononcé, et le retour aux valeurs de la glycémie à jeun beaucoup moins soudain.

Si l'on considère un aliment d'index glycémique plus faible que le glucose, il se compose en général de glucides immédiatement absorbables, et de glucides à absorption retardée. Les glucides immédiatement absorbables vont très rapidement passer dans la circulation sanguine, alors que ceux nécessitant une digestion préalable seront absorbés de manière plus ou moins retardée selon l'importance de cette digestion. La courbe de glycémie possèdera donc une pente d'augmentation moins forte que dans le cas du glucose, puisque ces glucides arrivent dans la circulation sanguine de manière retardée. La sécrétion d'insuline se déclenchant proportionnellement à la hausse de la glycémie, cette hausse sera moins importante et la diminution plus lente. La pente de décroissance sera ainsi plus faible. La réalité correspond à ce qui est représenté sur les figures 7 et 8.

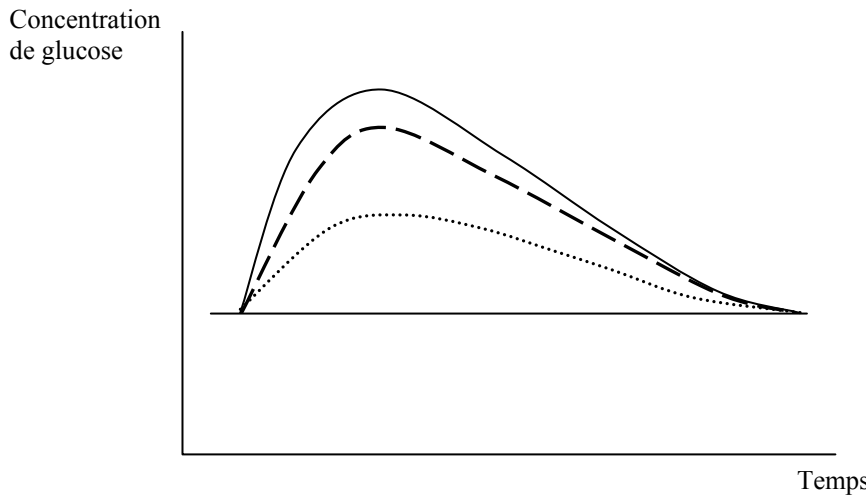


Figure 7 : représentation schématique des courbes de glycémies obtenues après l'ingestion de glucose (—), d'un aliment de fort index glycémique (- - -) et d'un aliment de faible index glycémique (.....).

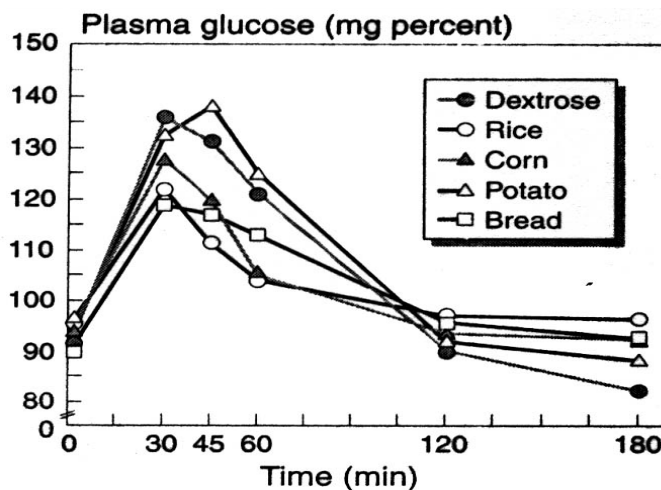


Figure 8 : Courbes de glycémie obtenues en réponse à l'ingestion de différents aliments (d'après [6])

Il est donc légitime de dire qu'un aliment de fort index glycémique entraîne un pic de glycémie plus important qu'un aliment de faible index glycémique. Ceci peut parfois être soumis à de légères variations. En effet, la sécrétion d'insuline peut être favorisée par d'autres nutriments que le glucose, notamment le calcium. Certains aliments peuvent ainsi induire d'abord une hausse de la courbe modeste, puis une décroissance de la courbe plus importante, ce qui diminue « artificiellement » leur index glycémique. Ceci est un cas de figure rare, mais qui peut se produire, notamment pour les aliments riches en calcium [46].

B) Perspectives d'avenir sur l'utilisation de l'index glycémique :

Un autre concept développé simultanément peut compléter celui de l'index glycémique chez les animaux sains : il s'agit de l'index insulinémique, qui est une déclinaison de l'index glycémique. La concentration plasmatique d'insuline mesurée après ingestion d'un aliment à tester, est comparée à la concentration obtenue après l'ingestion d'un aliment de référence. Ce concept n'est, par contre, pas ou très peu utilisable chez les diabétiques, du fait de leur faible sécrétion d'insuline.

Les résultats obtenus chez l'homme sont contradictoires et ne montrent pas forcément une corrélation entre l'index glycémique et l'index insulinémique. Ainsi des produits laitiers crus et fermentés, de faible index glycémique (entre 15 et 30) mais ne contenant aucune fibre, entraînent-ils une réponse insulinémique très supérieure à celle attendue [46]. Ceci est probablement dû, comme nous l'avons vu précédemment, à la richesse de ces aliments en calcium. En revanche, pour d'autres produits, eux aussi de faible index glycémique mais riches en fibres, les deux paramètres seront bien corrélés [5]. Il n'est donc pas *a priori* possible d'estimer l'index insulinémique au moyen de l'index glycémique, et il convient de bien séparer ces deux notions, qui sont en fait complémentaires.

Si l'on considère les produits laitiers et un aliment d'index glycémique très voisin, on constate que l'index insulinémique des produits laitiers est élevé, et celui de l'aliment riche en fibres est faible. Ainsi, l'index insulinémique a permis de lever l'ambiguïté concernant ces deux aliments, et les produits laitiers sont moins favorables en termes de sécrétion d'insuline qu'un aliment de même index glycémique riche en fibres.

Ainsi, l'index insulinémique serait pertinent chez l'individu sain, avec une réponse hormonale correcte et mesurable, alors que l'index glycémique est évalué peut-être plus précisément chez les diabétiques, où la glycémie n'est pas immédiatement restaurée à des valeurs normales par l'insuline.

De nouvelles analyses *in vitro*, permettant de classer les glucides d'un aliment en glucides rapidement disponibles (Rapidly Available Glucose, RAG) et glucides lentement disponibles (Slowly Available Glucose, SAG) peuvent servir à caractériser l'index glycémique d'un aliment. En effet, un aliment riche en glucides lentement disponibles possède logiquement un bas index glycémique. Les valeurs de glucides lentement disponibles et glucides rapidement disponibles et l'index glycémique d'un aliment semblent corrélées, mais l'étude porte sur un petit nombre d'aliments, et les procédures d'analyse sont complexes [16].

Pour déterminer les valeurs en glucides rapidement et lentement disponibles, les aliments soumis à un traitement initial à la pepsine sont placés dans des tubes à centrifugation et incubés avec un mélange d'enzymes hydrolytiques dans des conditions de pH, température, viscosité et agitation contrôlées. Des échantillons de ce mélange sont prélevés après 20 et 120 minutes.

Les glucides rapidement disponibles correspondent à la concentration en glucose de l'échantillon prélevé à 20 minutes, et les glucides lentement disponibles correspondent à la concentration en glucose de l'échantillon prélevé à 120 minutes de laquelle on soustrait la concentration de l'échantillon précédent. Cette méthode ainsi que d'autres [1] ne peuvent pas encore, compte tenu des données actuelles, être utilisées comme un substitut de l'index glycémique.

En définitive, il est certain que de nombreuses autres applications concrètes pourront découler du concept d'index glycémique, éventuellement complété par celui d'index insulinémique. De même, le concept principal de la théorie, substituer à la valeur alimentaire mesurée *in vitro* d'un nutriment sa réponse biologique, mériterait d'être développé pour d'autres nutriments que les glucides. La connaissance de la répercussion engendrée dans l'organisme par l'ingestion d'un aliment pourrait s'avérer plus intéressante que la connaissance de la valeur nutritive calculée de cet aliment. Ceci nécessiterait la mise au point d'autres outils d'analyse que ceux disponibles actuellement.

Conclusion

L'index glycémique a fait la preuve de son utilité pour mieux appréhender la réalité biologique au cours de la digestion. Il permet une meilleure compréhension non pas du mécanisme précis de la digestion, qui est bien connu, mais de la cinétique de digestion d'un aliment.

L'index glycémique permet de modifier l'ancienne classification des glucides pour en instaurer une nouvelle, qui dépend plus des conséquences sur le métabolisme de l'organisme que de la nature du glucide.

Les applications essentielles de ce concept concernent la gestion alimentaire du diabète et de l'obésité, mais d'autres applications existeraient dans le domaine de la santé animale, surtout si l'on tient compte des particularités alimentaires des carnivores domestiques. En effet, il est possible de nourrir un animal de manière prolongée avec un seul aliment, donc de contrôler parfaitement les apports alimentaires, ce qui est très difficilement réalisable chez l'homme. L'index glycémique mérite d'être mieux étudié chez les animaux, mais aussi chez l'homme en particulier en ce qui concerne les conséquences au long terme d'un régime de faible index glycémique. En parallèle avec le développement de l'index insulinémique, l'index glycémique peut apporter au praticien vétérinaire de nombreuses informations pratiques sur le devenir d'un aliment après ingestion. Ceci constituerait notamment une avancée intéressante pour la prescription d'aliments diététiques administrés en cas de diabète et d'obésité, et à ce titre pourrait faire l'objet d'une nouvelle disposition dans la loi régissant les obligations inhérentes aux aliments diététiques.

Enfin, un index de ce type, correspondant à un nouvel angle d'approche de l'alimentation en général, mériterait d'être développé pour d'autres nutriments que les glucides : il s'agit d'un début de mesure intégrée de la réponse de l'organisme à un aliment. L'adaptation aux autres nutriments mériterait d'être recherchée, mais ceci suppose le développement de méthodes globales de mesure.

Bibliographie :

- [1] Araya H., Contreras P., Alvina M., Vera G., Pak N.
A comparison between an in vitro method to determine carbohydrate digestion rate and the glycemic response in young men.
European Journal of Clinical Nutrition. 2002, **56** : 8, 735-739.
- [2] Araya H., Pak N., Vera G., Alvina M.
Digestion rate of legume carbohydrates and glycemic index of legume based meals.
International Journal of Food Sciences and Nutrition. 2003, **54** : 2, 119-126.
- [3] Augustin L.S.A., Dal Maso L., La Vecchia C., Parpinel M., Negri E., Vaccarella S., Kendall C.W.C., Jenkins D.J.A., Franceschi S.
Dietary glycemic index and glycemic load, and breast cancer risk: a case control study.
Annals of Oncology. 2001, **12** : 11, 1533-1538.
- [4] Augustin L.S., Franceschi S., Jenkins D.J.A., Kendall C.W.C, La Vecchia C.
Glycemic index in chronic disease: a review.
European Journal of Clinical Nutrition. 2002, **56** : 11, 1049-1071.
- [5] Bjorck I., Liljeberg H., Ostman E., Asp N.G., Frayn K., Vessby B.
Low glycaemic-index foods.
British Journal of Nutrition. 2000, **83** : Suppl. 1, S149-S155.
- [6] Blouza-Chabchoub S., Abid A., Beji-Serairi R., Alguemi C., Mami F.B., Mhenni F.B., Mansour A.B., Nagati K.
Réponses glycémiques et insulinémiques aux dattes, au pain et aux pommes de terre consommés isolément chez l'adulte sain.
Médecine et Nutrition. 2000, **36** : 3, 140-145.

[7] Bouche C., Rizkalla S.W., Luo J., Vidal H., Veronese A., Pacher N., Fouquet C., Lang V., Slama G.

Five week, low glycemic index diet decreases total fat mass and improves plasma lipid profile in moderately overweight nondiabetic men.

Diabetes Care. 2002, **25** : 5, 822-828.

[8] Brand Miller J.

L'index glycémique des aliments

Cahiers de Nutrition et Diététique, 1997, **32** : 1, 42-47.

[9] Brand Miller J.C.

Glycemic load and chronic disease.

Nutrition Reviews. 2003, **61** : 5, S49-S55.

[10] Chan H.M.S., Brand Miller J.C., Holt S.H.A., Wilson D., Rozman M., Petocz P.

The glycaemic index values of Vietnamese foods.

European Journal of Clinical Nutrition. 2001, **55**: 12, 1076-1083.

[11] Colagiuri S., Miller J.B., Biesalski H.K., Truswell S., Hill M.

The 'carnivore connection' evolutionary aspects of insulin resistance.

European Journal of Clinical Nutrition. 2002, **56** : Suppl.1, S30-S35.

[12] Corpet D.E., Peiffer G., Tache S.

Glycemic index, nutrient density, and promotion of aberrant crypt foci in rat colon.

Nutrition and Cancer. 1998, **32** : 1, 29-36.

[13] Darwiche G., Ostman E.M., Liljeberg H.G.M., Kallinen N., Bjorgell O., Bjorck I.M.E., Almer L.O.

Measurements of the gastric emptying rate by use of ultrasonography: studies in humans using bread with added sodium propionate.

American Journal of Clinical Nutrition. 2001, **74** : 2, 254-258.

[14] El Nehir S.

Determination of glycemic index for some breads.

Food Chemistry. 1999, **67**: 1, 67-69.

[15] Englyst H.N., Kingman S.M., Cummings J.H.

Classification and measurement of nutritionally important starch fractions.

European Journal of Clinical Nutrition. 1992, **46**, S33-S50.

[16] Englyst K.N., Vinoy S., Englyst H.N., Lang V.

Glycaemic index of cereal products explained by their content of rapidly and slowly available glucose.

British Journal of Nutrition. 2003, **89** : 3, 329-339.

[17] FAO/WHO Expert consultation. Carbohydrates in human nutrition.

Report of a joint FAO/WHO Expert consultation, Rome, 14-18 april, 1997. Rome :

Food and Agriculture Organisation, 1998. (FAO food and nutrition paper 66)

[18] Fleeman L.M., Rand J.S.

Evaluation of day-to-day variability of serial blood glucose concentration curves in diabetic dogs

Journal of American Veterinary Medical Association. 2003, **222** : 3, 317-321.

[19] Foster Powell K., Holt S.H.A., Brand Miller J.C.

International table of glycemic index and glycemic load values: 2002.

American Journal of Clinical Nutrition. 2002, **76** : 1, 5-56.

[20] Franceschi S., Maso L. dal, Augustin L., Negri E., Parpinel M., Boyle P., Jenkins D.J.A., Vecchia C. la, dal Maso L., la Vecchia C.

Dietary glycemic load and colorectal cancer risk.

Annals of Oncology. 2001, **12** : 2, 173-178.

[21] Frost G., Dornhorst A.

The relevance of the glycaemic index to our understanding of dietary carbohydrates.

Diabetic Medicine. 2000, **17** : 5, 336-345.

- [22] Frost G., Leeds A.A., Dore C.J., Madeiros S., Brading S., Dornhorst A.
Glycaemic index as a determinant of serum HDL cholesterol concentration.
Lancet (British edition). 1999, **353**: 9158, 1045-1048.
- [23] Gilbertson H.R., Thorburn A.W., Brand Miller J.C., Chondros P., Werther G.A.
Effect of low glycemic index dietary advice on dietary quality and food choice in
children with type 1 diabetes.
American Journal of Clinical Nutrition. 2003, **77** : 1, 83-90.
- [24] Graham P.A., Maskell I.E., Rawlings J.M., Nash A.S., Markwell P.J.
Influence of a high fibre diet on glycaemic control and quality of life in dogs with
diabetes mellitus.
Journal of Small Animal Practice, 2002, **43**, 67-73.
- [25] Heacock P.M., Hertzler S.R., Wolf B.W.
Fructose prefeeding reduces the glycemic response to a high glycemic index, starchy
food in humans.
Journal of Nutrition. 2002, **132** : 9, 2601-2604.
- [26] Hesta M., Debraekeleer J., Janssens G. P. J., De Wilde R.
The effect of a commercial high-fibre diet and an iso-malto-oligosaccharide-
supplemented diet on post-prandial glucose concentration in dogs
Journal of Animal Physiology and Animal Nutrition, 2001, **85**, 217-221.
- [27] Jenkins A.L., Jenkins D.J.A., Zdravkovic U., Wursch P., Vuksan V.
Depression of the glycemic index by high levels of beta glucan fiber in two functional
foods tested in type 2 diabetes.
European Journal of Clinical Nutrition. 2002, **56** : 7, 622-628.
- [28] Jenkins D.J.A., Kendall C.W.C., Augustin L.S.A., Franceschi S., Hamidi M.,
Marchie A., Jenkins A.L., Axelsen M.
Glycemic index: overview of implications in health and disease.
American Journal of Clinical Nutrition. 2002, **76** : 1, 266S-273S.

[29] Jenkins D.J.A, Wolever T.M.S., Taylor H.T.

Glycemic index of foods : a physiological basis for carbohydrate exchange

American journal of Clinical Nutrition, 1981, **34**, 362-366.

[30] Kienzle E.

Untersuchungen zum intestinal und intermediärstoffwechsel von kohlenhydraten (stärke verschiedener herkunft und aufbereitung, mono- und disaccharide) bei der hauskatze (Felis catus).

Hannover, Tierärztliche Hochschule, Habilitationsschrift. 1989.

[31] Kimmel S.E., Michel K.E., Hess R.S., Ward C.R.

Effects of insoluble and soluble dietary fiber on glycemic control in dogs with naturally occurring insulin-dependent diabetes mellitus.

Journal of American Veterinary Medical Association, 2000, **216**, 1076-1081.

[32] Larsen H.N., Rasmussen O.W., Rasmussen P.H., Alstrup K.K., Biswas S.K., Tetens I., Thilsted S.H., Hermansen K.

Glycaemic index of parboiled rice depends on the severity of processing: study in type 2 diabetic subjects.

European Journal of Clinical Nutrition. 2000, **54** : 5, 380-385.

[33] Liu S.M., Willett W.C., Stampfer M.J., Hu F.B., Franz M., Sampson L., Hennekens C.H., Manson J.E.

A prospective study of dietary glycemic load, carbohydrate intake, and risk of coronary heart disease in US women.

American Journal of Clinical Nutrition. 2000, **71** : 6, 1455-1461.

[34] Ludwig D.S.

Dietary glycemic index and obesity

Journal of Nutrition. 2000, **130**, S280-S283.

[35] Luscombe N.D., Noakes M., Clifton P.M.

Diets high and low in glycemic index versus high monounsaturated fat diets: effects on glucose and lipid metabolism in NIDDM.

European Journal of Clinical Nutrition. 1999, **53** : 6, 473-478.

[36] MacIntosh C.G., Holt S.H.A., Brand Miller J.C.

The degree of fat saturation does not alter glycemic, insulinemic or satiety responses to a starchy staple in healthy men.

Journal of Nutrition. 2003, **133**: 8, 2577-2580.

[37] Manas M., Yago M.D., Quiles J.L., Huertas J.R., Martinez-Victoria E.

Absence of rapid adaptation of the exocrine pancreas of conscious dog to diets enriched in fat or carbohydrates.

Archives of Physiology and Biochemistry. 1996, **104** : 7, 819-825.

[38] Martin G.J.W., Rand J.S.

Food intake and blood glucose in normal and diabetic cat fed ad libitum.

Journal of Feline Medicine and Surgery, 1999, **1**, 241-251.

[39] Meyer H., Kienzle E.

Dietary protein and carbohydrates : relationship to clinical disease.

Proceedings of Purina International Symposium in association with the Eastern states Veterinary Conference, Orlando, Florida, 1991 :13-26.

[40] Morris K.L., Zemel M.B.

Glycemic index, cardiovascular disease, and obesity.

Nutrition Reviews. 1999, **57** : 9, 273-276.

[41] Nantel G.

Glycemic carbohydrate: an international perspective.

Nutrition Reviews. 2003, **61** : 5, S34-S39.

[42] Nell T., Venter C., Vorster H., Botes I., Steyn F.

Intra and inter individual variation in glucose response to white bread and oral glucose in healthy women.

South African Journal of Clinical Nutrition. 2003, **16** : 2, 58-64.

[43] Nelson R.W., Scott-Moncrieff J.C., Feldman E.C., DeVries-Concannon S.E., Kass P.H., Davenport D.J., Kiernan C.T., Neal L.A.

Effect of dietary insoluble fiber on control of glycemia in cats with naturally acquired diabete mellitus.

Journal of American Veterinary Medical Association, 2000, **216**, 1082-1088.

[44] Nguyen P., Dumon H., Biourge V., Pouteau E.

Glycémic and insulinemic responses after ingestion of commercial foods in healthy dogs : influence of food composition.

Journal of Nutrition, 1998, **128**, S2654-S2658.

[45] Nguyen P., Gayet C., Briand F., Bailhache E., Leray V., Serisier S., Ouguerram K., Magot T., Siliart B.

Le chien, modèle de grand animal pour l'étude de l'insulinorésistance associée à l'obésité.

Bulletin de l'Académie Vétérinaire de France, 2004, **157**, 35-50.

[46] Ostman E.M., Elmstahl H.G.M.L., Bjorck I.M.E.

Inconsistency between glycemic and insulinemic responses to regular and fermented milk products.

American Journal of Clinical Nutrition. 2001, **74** : 1, 96-100.

[47] Parks E.J.

Dietary carbohydrate's effects on lipogenesis and the relationship of lipogenesis to blood insulin and glucose concentrations.

British Journal of Nutrition. 2002, **87** : Suppl. 2, S247-S253.

- [48] Pawlak D.B., Bryson J.M., Denyer G.S., Brand Miller J.C.
High glycemic index starch promotes hypersecretion of insulin and higher body fat in rats without affecting insulin sensitivity.
Journal of Nutrition. 2001, **131** : 1, 99-104.
- [49] Pi-Sunyer F.X.
Glycemic index and disease.
American Journal of Clinical Nutrition. 2002, **76** : 1, S290-S298.
- [50] Riccardi G., Clemente G., Giacco R.
Glycemic index of local foods and diets : the Mediterranean Experience
Nutrition Reviews, 2003, **61**, S56-S60.
- [51] Rizkalla S.W., Bellisle F., Slama G.
Health benefits of low glycaemic index foods, such as pulses, in diabetic patients and healthy individuals.
British Journal of Nutrition. 2002, **88** : Supplement 3, S255-S262.
- [52] Roberts S.B.
High glycemic index foods, hunger, and obesity: is there a connection?
Nutrition Reviews. 2000, **58** : 6, 163-169.
- [53] Schafer G., Schenk U., Ritzel U., Ramadori G., Leonhardt U.
Comparison of the effects of dried peas with those of potatoes in mixed meals on postprandial glucose and insulin concentrations in patients with type 2 diabetes.
American Journal of Clinical Nutrition. 2003, **78** : 1, 99-103.
- [54] Sievenpiper J.L., Vuskan V., Wong E.Y., *et al*
Effect of meal dilution on the posprandial glycemic response. Implications for glycemic testing
Diabetes Care. 1998, **21** : 711-716

[55] Slama G.

Y a-t-il encore des glucides interdits?

Cahiers de Nutrition et de Diététique. 2001, **36** : 5, 317-321.

[56] Stevens J., Ahn K., Juhaeri , Houston D., Steffan L., Couper D.

Dietary fiber intake and glycemic index and incidence of diabetes in African American and white adults: the ARIC study.

Diabetes Care. 2002, **25** : 10, 1715-1721.

[57] Sugiyama M., Tang A.C., Wakaki Y., Koyama W.

Glycemic index of single and mixed meal foods among common Japanese foods with white rice as a reference food.

European Journal of Clinical Nutrition. 2003, **57** : 6, 743-752.

[58] Vermeulen A., Turnbull W.H.

Feasibility of *The G.I. guide* to increase knowledge about the glycaemic index in practice.

Journal of Human Nutrition and Dietetics. 2000, **13** : 6, 397-405.

[59] Vialettes B.

Rapport glucides/lipides dans l'alimentation et tolérance glucidique.

Cahiers de Nutrition et de Diététique. 2001, **36** : 5, 327-330.

[60] Washabau R.J., Strombeck D.R., Buffington C.A., Harrold D.

Evaluation of intestinal carbohydrate malabsorption in the dog by pulmonary hydrogen gaz excretion.

American Journal of Veterinary research. 1986, **47**, 1402-1405.

[61] Wee S.L., Williams C., Gray S., Horabin J.

Influence of high and low glycemic index meals on endurance running capacity.

Medicine and Science in Sports and Exercise. 1999, **31** : 3, 393-399.

[62] Wess G., Reusch C.

Assessment of five portable blood glucose meters for use in cats
American Journal of Veterinary Research. 2000, **61** : 12, 1587-1592.

[63] Wiedmeyer C.E., Johnson P.J., Cohn L.A., Meadows R.L.

Evaluation of a continuous glucose monitoring system for use in dogs, cats, and horses

Journal of American Veterinary Medical Association. 2003, **223** : 7, 987-992.

[64] Wills J.M., Simpson K.W.

Le livre Waltham de la nutrition clinique du chien et du chat
Editions du Point Vétérinaire, 1996, 341 pages.

[65] Wolever T.M.S

Carbohydrate and the regulation of blood glucose and metabolism.

Nutrition Reviews. 2003, **61** : 5, S40-S48.

[66] Wolever T.M.S., Vorster H.H., Bjorck I., Brand Miller J., Brighenti F., Mann J.I.,
Ramdath D.D., Granfeldt Y., Holt S., Perry T.L., Venter C., Wu X.M.

Determination of the glycaemic index of foods: interlaboratory study.

European Journal of Clinical Nutrition. 2003, **57** : 3, 475-482.