



الجمهورية الجزائرية الديمقراطية الشعبية
République Algérienne Démocratique et Populaire
وزارة التعليم العالي والبحث العلمي

Ministère de l'Enseignement Supérieur et de la Recherche Scientifique

جامعة محمد البشير الإبراهيمي برج بوعريريج

Université Mohammed El Bachir El Ibrahimi B.B.A

كلية علوم الطبيعة والحياة وعلوم الأرض والكون

Faculté des Sciences de la Nature et de la Vie et des Sciences de la Terre et de l'Univers

قسم العلوم البيولوجية

Département des Sciences Biologiques



Mémoire

En vue de l'obtention du diplôme de Master

Domaine des Sciences de la Nature et de la Vie

Filière : Sciences Biologiques

Spécialité : Biochimie

Intitulé :

**Etude phytochimique et activités biologiques de
Trigonella foenum-graecum L: Etude bibliographique**

Présenté par:

KOUACHI Riane & CHARIF Bothaina

Soutenu le 11 / 06 / 2024, Devant le Jury :

| | Nom & Prénom | Grade | Affiliation / institution |
|----------------|---------------------------|-------|----------------------------------|
| Président : | Mme. BELALMI Nor El Houda | MAA | Université de Bordj Bou Arreridj |
| Encadrante : | Mme. BENOUADAH Zohra | MCB | Université de Bordj Bou Arreridj |
| Examinatrice : | Mme. BOUMERFEG Sabah | Pr. | Université de Bordj Bou Arreridj |

Année Universitaire 2023/2024

Dédicace

Avec l'expression de ma reconnaissance, je dédie ce modeste travail à ce qui, quels que soient les termes embrassés, je n'arriverais jamais à leur exprimer mon amour sincère.

À l'homme, ma précieuse offre du Dieu, qui doit ma vie, ma réussite, et tout mon respect: mon cher père Farid.

À la femme qui a souffert sans me laisser souffrir, qui n'a jamais dit non-âmes exigences et qui n'a épargné aucun effort pour me rendre heureuse : mon adorable maman.

À mes chères sœurs : Maroua, Riham, Ikram, qui ont partagé avec moi tous les moments d'émotion et n'ont pas cessé de me conseiller, encourager et soutenir tout au long de mes études, que Dieu les protège et leur offre la chance et le bonheur.

À mon cher frère Mohammed, pour toute l'ambiance dont il m'a entouré. Que Dieu le Tout-puissant le protège.

À tous mes oncles maternels : Hasni, Rachid, Sabir et Antar. Merci vivement de vos encouragements.

À ma grand-mère zuina, mon amour, la lumière de mes yeux et la joie de mon cœur... A toute ma famille surtout ma tante Samah.

Riane



Dédicace

" Je dédie le fruit de mes efforts "

À mes parents, que Dieu les protège et leur accorde une longue vie

À ma sœur, compagne de mon chemin

À mon frère, la prunelle de mes yeux

À tous les membres de ma famille

À chaque personne chère à mon cœur

À tous ceux qui ont contribué à mon succès

Bothaína



Remerciement

Au terme de notre modeste travail, nous tenons à remercier tous d'abord Dieu, le Tout Puissant de nous avoir accordés la volonté, force, santé, détermination et courage afin d'accomplir notre mémoire.

Nous tenons à remercier vivement le président de jury Dr BELALMI Nor El Houda de nous avoir fait l'honneur de présider le jury.

Nous tenons également à remercier Pr BOUMERFEG Sabah d'avoir accepté d'examiner notre travail.

Nous tenons à exprimer nos profondes gratitudees à notre promoteur Dr BENOUADAH Zohra pour la manière dont elle nous a encadrés. Nous lui sommes reconnaissants pour la confiance qu'elle nous a accordés. Ses remarques constructives que nous avons beaucoup apportées tout au long de ce travail.

Enfin, nous remercions profondément tous ceux qui ont contribué de près ou de loin à la réalisation de ce travail

Bothaina et Riane

Table des matières

| Titre | Page |
|---|----------|
| Remerciement | / |
| Liste des abréviations | / |
| Liste des figures | / |
| Liste des tableaux | / |
| Résumé | / |
| Introduction..... | 1 |
| Chapitre I : Présentation de <i>Trigonella fœnum-graecum</i> L | |
| I.1. Historique | 3 |
| I.2. Position systématique | 3 |
| I.3. Noms vernaculaires | 4 |
| I.4. Origine et distribution géographique | 4 |
| I.4.1. Origine du Fenugrec | 4 |
| I.4.2. Répartition géographique..... | 4 |
| I.5. Description botanique du fenugrec | 5 |
| I.5.1. Description de la plante..... | 5 |
| I.5.2. Racine | 6 |
| I.5.3. Tige (pied) | 7 |
| I.5.4. Feuilles..... | 7 |
| I.5.5. Fleurs | 8 |
| I.5.6. Fruits (gousses) | 8 |
| I.5.7. Graines | 9 |
| I.6. Utilisation de <i>Trigonella foenum- graecum</i> L..... | 9 |
| I.6.1. Utilisation thérapeutique..... | 9 |
| I.6.2. Utilisation nutritionnel..... | 10 |
| I.6.2.1. Nourriture humaine..... | 10 |
| I.6.2.2. Fenugrec comme fourrage | 12 |
| I.7. Toxicité..... | 13 |
| Chapitre II : Composition phytochimique de <i>Trigonella fœnum-graecum</i> L | |
| II.1. Métabolites primaires | 14 |
| II.1.1. Glucides..... | 15 |
| II.1.2. Lipides | 16 |
| II.1.3. Protéines | 17 |

| | |
|---|----|
| II.1.4. Fibres alimentaires..... | 18 |
| II.1.5. Vitamines..... | 18 |
| II.1.6. Minéraux | 19 |
| II.2. Métabolites secondaires | 20 |
| II.2.1. Phytochimie des feuilles, racine et de la tige | 21 |
| II.2.2. Phytochimie des graines | 23 |
| II.2.2.1. Composés stéroïdiens et saponines | 24 |
| II.2.2.2. Alcaloïdes | 24 |
| II.2.2.3. Flavonoïdes..... | 25 |
| II.2.2.4. Coumarine | 26 |
| Chapitre III : Activité biologiques de <i>Trigonella fœnum-graecum L</i> | |
| III.1. Activité anticancéreuse | 27 |
| III.1.1. Cancer du sein..... | 29 |
| III.1.2. Cancer de colon..... | 30 |
| III.1.3. Cancer Pancréatiques | 30 |
| III.1.4. Cancer hépatique..... | 30 |
| III.2. Activité hypoglycémiante | 30 |
| III.3. Activité hypolipidémiante | 33 |
| III.4. Activité anti-inflammatoire..... | 34 |
| III.5. Activité antimicrobienne..... | 35 |
| III.5.1. Activité antifongique..... | 35 |
| III.5.2. Activité antibactérienne | 35 |
| III.5.3. Activité antivirale..... | 37 |
| III.6. Activité antioxydante | 37 |
| III.7. Activité cardioprotectrice..... | 38 |
| III.8. Activité gastroprotectrice | 39 |
| III.9. Activité hépatoprotectrice | 40 |
| III.10. Activité Neuroprotectrice..... | 41 |
| III.11. Activité anti-cataracte | 42 |
| III.12. Autres avctivités..... | 43 |
| III.12.1. Stimulation de la capillogénase | 43 |
| III.12.2. Stimulation lactogénique | 43 |
| Conclusion | 45 |
| Références bibliographiques | / |

Liste des abréviations

AchE: Acétylcholinestérase

AD: Alzheimer's disease (la maladie d'Alzheimer)

ADN: Acide désoxyribonucléique

AgNP: Nanoparticule d'argent

ALT: Alanine aminotransférase

AMPK: La voie AMPK, ou voie de l'AMP-activated protein kinase

AST: Aspartate aminotransférase

AVC: Accident vasculaire cérébral

Bax: Bcl-2-associated X protein (Protéine X associée à Bcl-2)

Bcl-2: B-cell lymphoma 2 protein (Protéine de lymphome de cellules B2)

Bp: Base pair (Paire de bases)

Br: Brome

Ca: Calcium

CAT: Catalase

Co: Cobalt

Cr: Chrome

Cu: Cuivre

EV71: Entérovirus 71

Fe: Fer

FeNP: Nanoparticule de fer

FMDV: Foot-and-mouth disease virus (Maladie de la fièvre aphteuse)

FS: Fenugrec seed

GAE: Gallic acid equivalent (Équivalent acide gallique)

GPx: Glutathion peroxydase

GSH: Glutathion

H⁺/K⁺ ATPase: H⁺/K⁺ adénosyltriphosphatase pompe à proton

IC50: Median inhibitory concentration (Concentration inhibitrice médiane)

IFN-g: Interferon gamma

IL-1 : Interleukine-1 alpha

IXe: Signifie neuvième

JAK1: Janus kinase 1

JC: Jésus-Christ

K: Potassium

LD50: Median lethal (dose Dose létale médiane)

LDH: Lactate déshydrogénase

LPS: Lipopolysaccharide

Mg: Magnésium

MDA: Malondialdéhyde

Mn: Manganèse

Mm: Millième de mètre (unité de longueur dérivée du mètre)

Na: Sodium

NF-KB: Nuclear factor-kappa B (facteur nucléaire kappa B)

OMS: Organisation Mondiale de la Sante

PD: Parkinson's disease (La maladie de Parkinson)

P: Phosphore

ROS: Reactive oxygen species (Espèces réactives d'oxygène)

S: Soufre

SARS-CoV-2: Severe acute respiratory syndrome coronavirus 2

SNC: Substance noire compacte

SOD: Superoxyde dismutase

Sr: Strontium

TBARS: Thiobarbituric acid reactive substances

TFG: Trigonella fœnum-græcum

TLR4: Toll Like Receptor 4

TNF-: Tumor necrosis factor alpha (Facteur de nécrose tumorale alpha)

TRL: Trigonelline

UI: Unité Internationale

VHB: Virus de l'hépatite B

VHC: Virus de l'hépatite C

XVIe: signifie 16ème

Zn: Zinc

µg: Microgramme

Liste des figures

| | |
|---|-----------|
| Figure 1: Distribution des cultures de fenugrec | 5 |
| Figure 2: <i>Trigonella foenum-graecum</i> L..... | 6 |
| Figure 3: Racine du fenugrec..... | 6 |
| Figure 4: Pied de <i>Trigonella</i> | 7 |
| Figure 5: Feuilles de fenugrec..... | 7 |
| Figure 6: <i>Trigonella</i> fleurissante..... | 8 |
| Figure 7: Fruit de <i>Trigonella foenum-graecum</i> | 9 |
| Figure 8: Graines de fenugrec..... | 9 |
| Figure 9: Produits de fenugrec sur le marché..... | 12 |
| Figure 10: Galactomannane de fenugrec..... | 16 |
| Figure 11: Composants d'huile fixe des graines de fenugrec..... | 17 |
| Figure 12: Structure chimique de 4-hydroxyisoleucine..... | 18 |
| Figure 13: Les composés bioactifs de fenugrec..... | 21 |
| Figure 14: Structure chimique de scopoletine, acides chlorogénique..... | 22 |
| Figure 15: Structure chimique de graécunine G..... | 22 |
| Figure 16: Structure chimique de trigocoumarine..... | 23 |
| Figure 17: Principaux métabolites secondaires et contexte des graines de fenugrec | 23 |
| Figure 18: Structure chimique de la diosgénine..... | 24 |
| Figure 19: La trigonelline présente dans les graines de fenugrec et la vitamine PP dont elle est le précurseur..... | 25 |
| Figure 20: Flavonoïdes du fenugrec..... | 26 |
| Figure 21: Effets pharmacologiques des composants bioactifs du fenugrec..... | 27 |
| Figure 22: Principales caractéristiques du cancer ciblées par les extraits de fenugrec et les composés bioactifs..... | 28 |
| Figure 23: Activité antidiabétique de la <i>trigonella</i> | 31 |
| Figure 24: Mécanisme d'action des graines de fenugrec dans le contrôle du diabète | 32 |
| Figure 25: Effet de réduction du cholestérol du fenugrec..... | 34 |
| Figure 26: La biosynthèse de nanoparticules de fer en utilisant l'extrait de graines de <i>Trigonella</i> et ses applications antibactériennes..... | 36 |
| Figure 27: Un Aperçu des utilisations médicinales potentielles du <i>Trigonella</i> | 38 |
| Figure 28: Activité gastroprotectrice des graines de fenugrec..... | 40 |
| Figure 29: Les effets neuroprotecteurs et antidiabétiques de la trigonelline..... | 42 |
| Figure 30: Le fenugrec (<i>Trigonella foenum-graecum</i> L.) dans la santé des femmes | 44 |

Liste des tableaux

| | |
|--|-----------|
| Tableau I: Situation botanique de l'espèce <i>Trigonella fœnum-græcum</i> | 3 |
| Tableau II: Noms communs du Fenugrec..... | 4 |
| Tableau III: Composition des feuilles fraîches et des graines mures de fenugrec..... | 14 |
| Tableau IV: Profils vitaminiques et leurs concentrations respectives dans le fenugrec | 19 |
| Tableau V: Minéraux présents dans les graines de fenugrec | 20 |

ملخص

نبات "الحلبة" (*Trigonella foenum-graecum L*) هو عشب سنوي منتصب ينتمي إلى عائلة البقوليات، ينمو في تربة كلسية ورطبة قليلاً. ثمرة هذا النبات عبارة عن جراب مقوس ممدود يحتوي على 10 إلى 20 بذرة.

الحلبة، سواء في أوراقها أو بذورها، تحتوي على ثروة من العناصر الغذائية بما في ذلك البروتينات والسكريات والألياف والأحماض الدهنية، بالإضافة إلى الفيتامينات والمعادن. بالإضافة إلى ذلك، فإنها معروفة بتنوع مركباتها النشطة بيولوجياً مثل المركبات الستيرويدية، والصابونينات، والقلويدات، والفلافونويدات، والكومارين. هذا النبات مستخدم منذ فترة طويلة في عدة بلدان لأغراض غذائية، وكخضار، وكعلف، وفي الطب التقليدي.

المركبات النشطة بيولوجياً في الحلبة تمنحها خصائص علاجية متنوعة، مثل قدرتها على مكافحة الأورام وتأثيراتها الخافضة لمستوى السكر في الدم والدهون، وتأثيرها المضاد للالتهاب، بالإضافة إلى خصائصها المضادة للفطريات والبكتيريا والفيروسات، وقدرتها على تحفيز إدرار الحليب، وخصائصها المضادة للأكسدة والمحافظة على صحة القلب وحماية المعدة.

الكلمات المفتاحية: نبات الحلبة، البقوليات، ترينجولين، ديوسجينين، فلافونويدات، مركبات فيتوكيميائية.

Résumé

La plante de "fenugrec" (*Trigonella foenum-graecum* L.) est une herbe annuelle, érigée, appartenant à la famille des légumineuses, poussant dans une terre calcaire et un peu humide. Le fruit de cette plante est une gousse allongée, arquée, renfermant de 10 à 20 graines.

Le fenugrec, à la fois dans ses feuilles et ses graines, contient une richesse d'éléments nutritifs incluant des protéines, des sucres, des fibres, des acides gras, ainsi que des vitamines et des minéraux. De plus, il est connu pour sa variété de composés biologiquement actifs comme les composés stéroïdiens, les saponines, les alcaloïdes, les flavonoïdes et les coumarines. Ce végétal est utilisé depuis longtemps dans plusieurs pays à des fins alimentaires, comme légume, pour le fourrage et en médecine traditionnelle.

Les composés biologiquement actifs du fenugrec lui confèrent diverses propriétés thérapeutiques, telles que son potentiel anti-tumoral, ses effets hypoglycémiants et hypolipidémiants, son action anti-inflammatoire, ainsi que ses propriétés antifongiques, antibactériennes, antivirales, galactogènes, antioxydantes, cardioprotectrices et gastroprotectrices.

Mots-clés : *Trigonella foenum-graecum*, fenugrec, Fabaceae, trigonelline, diosgénine, flavonoïdes, composition phytochimique.

Introduction



Introduction

Introduction

La nature a été une source de plantes médicinales depuis des milliers d'années, depuis les débuts de l'humanité (Sharma *et al.*, 2016). Les plantes sont utilisées par 80 % de la population mondiale, principalement dans les pays en développement, pour soigner et améliorer la santé générale, en raison de la croyance selon laquelle les médicaments d'origine végétale sont sans effets secondaires (Al-Asadi, 2014).

Les produits à base de plantes, aujourd'hui, représentent une sécurité perçue contrairement aux produits synthétiques jugés dangereux pour l'homme et l'environnement (Nathiya *et al.*, 2014). De plus, le taux de réussite des médicaments synthétiques est très faible en raison de leurs nombreux inconvénients tels que leurs effets indésirables, leur faible efficacité et leur prix élevé. Ainsi, les nouveaux médicaments thérapeutiques naturels doivent surmonter ces désavantages des médicaments synthétiques (Singh *et al.*, 2022).

Parmi de nombreuses plantes médicinales, le fenugrec [*Trigonella foenum-graecum L*] qui a récemment attiré l'attention des scientifiques du monde entier (Yadav et Baquer, 2014). Le fenugrec est une plante annuelle appartenant à la famille des Fabaceae (légumineuses) (Gayyur *et al.*, 2021). Le fenugrec est originaire d'Europe de l'Est et de certaines régions d'Asie. Il est aujourd'hui largement cultivé partout dans le monde (Yadav et Baquer, 2014).

Leurs graines et feuilles sont couramment utilisées à des fins cosmétiques, médicales et thérapeutiques (Shawky *et al.*, 2022). Elles sont également utilisées pour traiter les plaies, la diarrhée, l'acné, la déshydratation, l'anémie, la bronchite, les rhumatismes, les maux d'estomac, l'hypertension artérielle, la constipation, les traitements capillaires et l'augmentation mammaire, que ce soit sous forme de décoctions ou de graines réduites en farine et mélangées avec du miel (Rahmani *et al.*, 2018).

La graine de fenugrec mature contient de nombreux composants actifs tels que des acides aminés, des acides gras, des vitamines et des saponines comme la diosgénine, la gitogénine, la néogitogénine, la homorientine, la saponarétine, la néogigogénine et la trigogénine, des fibres, des flavonoïdes, des polysaccharides, des huiles fixes et certains alcaloïdes identifiés, à savoir la trigonelline et la choline (Yadav et Baquer, 2014).

Le fenugrec est bien connu pour ses multiples propriétés pharmacologiques, notamment antidiabétiques, antioxydantes, hypocholestérolémiantes, anti-inflammatoires,

Introduction

anti-tumorales, antimicrobiennes, hépatoprotectrices, gastroprotectrices, cardioprotectrices, neuroprotectrices, anti-cataracte et stimulantes de lactation (Varshney et Siddique, 2023).

L'objectif de ce travail est focalisé sur la collecte et l'étude attentive des données afin de fournir une synthèse générale contenant les propriétés phytochimiques ainsi que les principaux effets thérapeutiques de *Trigonella foenum-graecum L.*

Ce mémoire est structuré en trois parties : la première aborde une présentation générale du fenugrec, la deuxième explore son profil phytochimique, et la troisième examine ses activités biologiques.

Chapitre I
Présentation de
Trigonella foenum-
graecum L.



I. Présentation de *Trigonella foenum-graecum* L

I.1. Historique

Le fenugrec, scientifiquement connu sous le nom de *Trigonella foenum-graecum*, appartient au genre végétal *Trigonella* qui vient du latin « trigonum » signifiant trigone/triangle, se référant probablement à la forme triangulaire des fleurs. Le nom latin de l'espèce foenum-graecum signifie « foin grec », en référence au parfum intense de la plante séchée du fenugrec (Parthasarathy et al., 2008).

Le fenugrec est l'une des plus anciennes cultures d'épices cultivées au monde, il est cultivé pour sa valeur médicinale et fourragère en Inde, en Afrique de l'Ouest et dans la vallée du Nil depuis l'Antiquité, et est utilisé pour la consommation humaine et animale. En Égypte, il a été cultivé depuis 1000 avant JC., et il fait partie du régime alimentaire indien depuis plus de 3 000 ans (Malhotra, 2011). Les graines de fenugrec carbonisées récupérées du Pendjab, en Inde, indiquent leur valeur dans le commerce dès 2000 à 1700 avant JC (Nathiya et al., 2014). Des graines de fenugrec ont été trouvées dans la tombe de Toutankhamon (Petropoulos, 2002). Le fenugrec a été introduit dans la médecine chinoise sous la dynastie des Sung, en 1057 après JC (Sun et al., 2021). Rosengarten (1969) a rapporté que les Romains ont obtenu la plante des Grecs et qu'elle est devenue un produit commercial de l'Empire romain (Malhotra, 2011). Le fenugrec a été introduit dans l'Europe centrale au début du IXe siècle (Sarwar et al., 2020).

I.2. Position systématique

Le genre *Trigonella foenum-graecum* L est la seule espèce cultivée dont plusieurs auteurs prétendent que le fenugrec sauvage *T. gladiata* est l'ancêtre direct de l'espèce cultivée (Rouag, 2021).

Systématiquement, le *Trigonella* est classifié comme suit (**Tableau 1**).

Tableau 1: Situation botanique de l'espèce *Trigonella foenum-graecum* L. (Ghedira et al., 2010).

| | |
|---------------------------|-------------------------------------|
| Règne | Plantae |
| Sous-règne | Tracheobionta |
| Embranchement | Magnoliophyta |
| Sous-embranchement | Magnoliophytina |
| Classe | Magnoliopsida |
| Sous-classe | Rosidae |
| Ordre | Fabales |
| Famille | Fabaceae |
| Genre | <i>Trigonella</i> L. |
| Espèce | <i>Trigonella foenum-graecum</i> L. |

I.3. Noms vernaculaires

L'espèce *T. foenum-graecum*, sauvage ou cultivée, est largement répandue dans le monde entier, ainsi qu'est indiqué par le grand nombre de noms (**Tableau 2**) (Petropoulos, 2002).

Tableau 2: Noms communs du Fenugrec (*Trigonella foenum graecum*) (Shashikumar et al., 2019).

| Langage | Noms usuels |
|-------------|----------------------------------|
| L'arabe | Hulba, Hilbeh |
| Anglais | Fenugrec |
| Français | Fenugrec, Trigonelle |
| Inde | Methi, Saag methi, Kasuri methi |
| Allemande | Bockshornklee, Griechisch Heu |
| Japonaises | Koruha, Fenu-guriku |
| Néerlandais | Fenugriek |
| Roumain | Molotru, Molotru comun, Schinduf |

I.4. Origine et distribution géographique

I.4.1. Origine du Fenugrec

Il existe différentes affirmations sur l'origine du fenugrec. Vavilov (1926) a suggéré que le fenugrec est originaire de la région méditerranéenne, alors qu'il y avait d'autres qui prétendent qu'il est d'origine asiatique (Naeem et al., 2021). De Candolle (1964) et Fazli et Hardman (1968) notent que le fenugrec pousse sauvagement au Punjab et au Cachemire, dans les déserts de la Mésopotamie et de la Perse, en Asie Mineure et dans certains pays d'Europe méridionale comme la Grèce, l'Italie et l'Espagne (Mehrafarin, 2013). De tels désaccords sur l'origine du fenugrec suggèrent que son emplacement est encore discutable (Naeem et al., 2021).

I.4.2. Répartition géographique

Le fenugrec est une culture du monde ancien et est actuellement connu pour avoir une large distribution mondiale (figure 1) (Basu et al., 2019). Cette large répartition et cette culture dans le monde sont caractéristiques de son adaptation aux conditions climatiques et aux environnements de culture variables (Malhotra, 2011). Il est maintenant cultivé dans six continents, à savoir Europe, Afrique, Asie, Sud Amérique, Amérique du Nord et Australie (Peter, 2012). Mais les principales zones productives du fenugrec comprennent la

Chine, la Turquie, le Pakistan, l'Espagne, l'Inde, l'Argentine, la France, le Maroc et l'Égypte (Aasim *et al.*, 2018). L'Inde est le plus grand producteur au monde, le Rajasthan est le bol de fenugrec du pays, contribuant à environ 80% de la production du pays (Lal *et al.*, 2014). La superficie annuelle cultivée en fenugrec s'élève à environ 57 000 hectares avec une production de semences de 68 000 tonnes (Petropoulos, 2002). En Algérie, elle est fréquemment cultivée et souvent sub-spontanée (Rahmani, 2017).

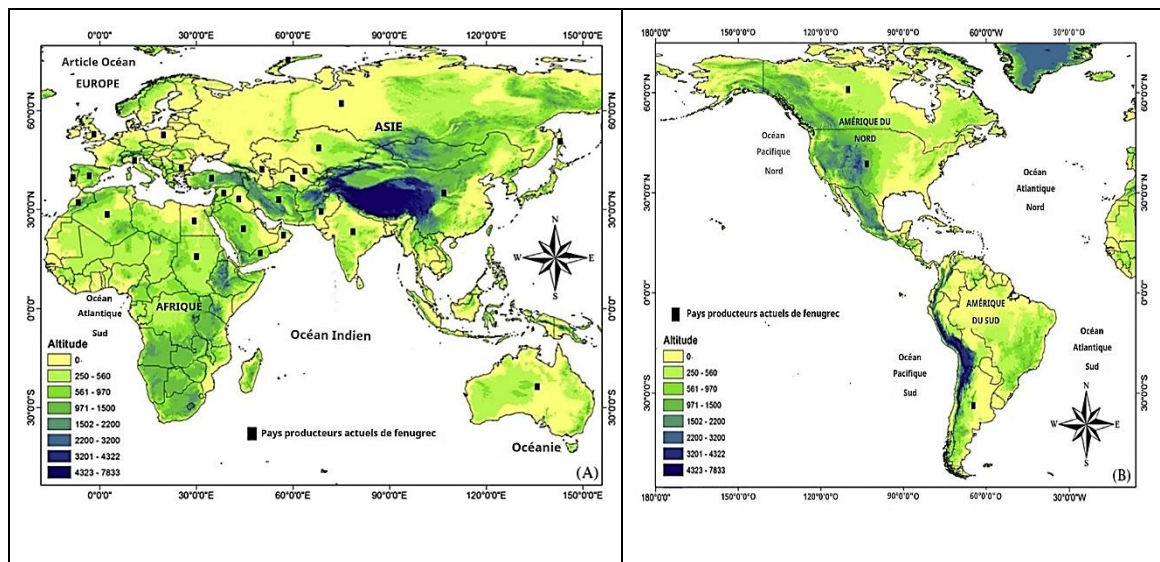


Figure 1: Distribution des cultures de fenugrec. (A) Carte montrant les continents d'Europe, d'Asie, d'Afrique et d'Océanie ; (B) carte montrant les Amériques du Nord et du Sud (Basu *et al.*, 2019).

I.5. Description botanique du fenugrec

I.5.1. Description de la plante

Le fenugrec (figure 2) est une épice annuelle aromatique, dressée et velue, faisant partie de la famille des légumineuses et ressemblant beaucoup au grand trèfle. La plante atteint une hauteur d'environ trois pieds (Amalraj *et al.*, 2022) et possède une racine principale bien développée (Oueslati et Ghédira, 2015). Les plantes ont des feuilles qui alternent autour de tiges circulaires, devenant semi-ligneuses en vieillissant. Elles présentent souvent une ramification étendue en raison d'une croissance indéterminée, qui prédomine chez la plupart des plantes. Les fleurs mûrissent pour former de longues gousses minces qui peuvent se tordre avec l'âge (Thomas *et al.*, 2011). La plante diffuse des arômes épicés qui persistent sur la main après avoir été touchée (Amalraj *et al.*, 2022). Le fenugrec nécessite un climat modérément frais pour une croissance adéquate et un rendement élevé. Il peut être cultivé dans tous les types de sols riches en matière organique et avec un bon drainage, et il peut également tolérer des conditions de salinité (Parthasarathy *et al.*, 2008).



Figure 2: *Trigonella foenum-graecum* L (Mohammad *et al.*, 2019).

I.5.2. Racine

La racine est un amas de structures en forme de doigts (kor *et al.*, 2013) (figure 3). La plante a initialement une croissance en pivot, suivie d'un grand nombre de racines secondaires. Les racines forment des nodosités racinaires et établissent une relation symbiotique avec la bactérie *Rhizobium* pour fixer l'azote atmosphérique (N) (Malhotra, 2011). La nodosité est le point focal de la réaction entre les *Rhizobia* et la plante de fenugrec. Il existe des nodosités efficaces et inefficaces. Les premières sont généralement grandes, allongées, souvent regroupées sur les racines primaires, tandis que les secondes sont généralement petites et principalement dispersées sur les racines secondaires. Les nodosités efficaces et inefficaces surviennent fréquemment simultanément sur le système racinaire de la plante (Petropoulos, 2002).



Figure 3: Racine du fenugrec (Petropoulos, 2002 ; Naeem *et al.*, 2021).

I.5.3. Tige (pied)

La tige mesure généralement de 30 à 60 cm de longueur (Amalraj et *al.*, 2022). Elle est circulaire à légèrement quadrangulaire, parcimonieusement pubescente (Peter, 2012). Rarement simple, généralement creuse et rarement entièrement verte ; elle est dressée, ramifiée, verte, lisse et herbacée. Le développement d'une coloration rose reflète le dépôt d'anthocyanes (Habtemariam, 2019) (figure 4).



Figure 4: Pied de *Trigonella* (Rouag, 2021).

I.5.4. Feuilles

Les feuilles sont pennées, avec des pétioles, disposées de manière alternative, et composées de trois folioles ovales (Ghedira et *al.*, 2010), dentées, mesurant entre 20 et 25 mm de longueur (Rouag, 2021) et présentant une teinte gris-verte. Elles sont également finement poilues, dentées près de l'apex la dentelure est plus prononcée dans les feuilles supérieures que dans les inférieures. Les pétioles et les lames des folioles présentent une teinte anthocyane variable de vert (Habtemariam, 2019) (figure 5).



Figure 5: Feuilles de fenugrec (Kara et Surmen, 2023).

I.5.5. Fleurs

Les fleurs (figure 6) sont axillaires, groupées par paires, rarement solitaires. La fleur de fenugrec est sessile, dite papilionacée, assez grande, de couleur jaune pâle à violet clair (Rahal et *al.*, 2023). Elles sont assises dans l'aisselle des feuilles ovales et dentées. Sa floraison, selon le climat et la saison de semis, commence environ 35 à 40 jours après le semis (Petropoulos, 2002). Il existe également deux types de fleurs de fenugrec: les fleurs cleistogames (fermées) sont généralement autofécondées et les fleurs aneictogames (ouvertes) naissent généralement sur les pousses « aveugles »; et offrent de nombreuses opportunités de pollinisation croisée (Mehrafarin, 2013).



Figure 6: *Trigonella* fleurissante (Rouag, 2021 ; Singh et *al.*, 2022).

I.5.6. Fruits (gousses)

Les gousses en forme de faucille et la couleur passe du vert ou violet clair au brun ou au brun jaunâtre à maturité (Malhotra, 2011) (figure 7). Elles ont un bec, mesurent de 9,5 à 18,6 cm de long et de 0,2 à 10,4 cm de large, sont courbées et rarement droites, avec des poils éphémères (Habtemariam, 2019). Environ 10 à 20 graines sont produites à partir de chaque gousse mûre (Singh et *al.*, 2022). Les gousses jumelles sont un très bon indice de sélection pour un contenu en graines de diosgénine plus élevé (Petropoulos, 2002).



Figure 7: Fruit de *Trigonella foenum-graecum* (Oueslati et Ghédira, 2015 ; Rouag, 2021).

I.5.7. Graines

Les graines sont de couleur brune jaunâtre, petites, de forme rhomboïdale et dure, mesurant de 3 à 6 mm de long, de 2 à 5 mm de large et 2 mm d'épaisseur (figure 8). Elles sont connues pour leur saveur agréablement amère et d'érable (Visuvanathan et *al.*, 2022). Elles sont aplaties et marquées par une rainure qui les divise en deux parties inégales (Basu et *al.*, 2014). Elles contiennent un embryon central dur et jaune entouré d'une couche de blanc semi-transparent et coriace d'endosperme, qui contient la gomme galactomannane. Une enveloppe tenace et brun foncé entoure l'endosperme (Visuvanathan et *al.*, 2022).



Figure 8: Graines de fenugrec (Kara et Surmen, 2023).

I.6. Utilisation de *Trigonella foenum-graecum* L

I.6.1. Utilisation thérapeutique

- ❖ Le fenugrec était apprécié comme une plante médicinale remarquablement polyvalente qui pouvait être utilisée comme remède pour une grande variété de conditions. Il est

utilisé pour le rajeunissement, diurétique, pour les plaintes digestives (dyspepsie, constipation), goutte, arthrite, (Peter, 2012).

- ❖ Cette plante est utilisée pour traiter les maladies de la peau comme les taches noires et l'odeur ennuyeuse du corps, de la bouche et de la sueur. Les herbistes ont utilisé cette plante pour les problèmes rénaux et les conditions affectant le système reproducteur masculin. Les feuilles et les graines ont des propriétés médicinales importantes :
 - Réduire la glycémie et le cholestérol sanguin (Naeem et *al.*, 2021).
 - Soulage la fièvre, réduit la douleur, soulage l'enflure et augmente l'appétit (Mohammad et *al.*, 2019).
 - Prévenir l'apparition de certains types de cancer, en particulier du côlon, de la poitrine et de la vésicule biliaire (Rahal et *al.*, 2023).
 - Traiter les problèmes respiratoires, les maladies oculaires et les troubles gynécologiques (faciliter l'accouchement) (Yaldiz et Camlica, 2021).
- ❖ Le fenugrec a une action favorable sur la purification du sang, et de détoxifier le corps, est également connu sous le nom d'herbe de purification lymphatique (Hanif et *al.*, 2019).
- ❖ Extérieurement il est utilisé dans les poultrices pour l'inflammation locale de la peau, les ulcères, les abcès, les brûlures et l'eczéma (Peter, 2012). Le fenugrec est utilisé pour préparer des infusions, des extraits d'eau et d'alcool, des toniques aux propriétés antidépresseurs et psychotoniques, et des suppléments de croissance musculaire (Naeem et *al.*, 2021).

I.6.2. Utilisations agro-alimentaires

Le fenugrec est largement utilisé en culture alimentaire en Inde, dans la région méditerranéenne, en Afrique du Nord et au Yémen (Malhotra, 2011). Les graines et les herbes de fenugrec sont connues pour leur odeur forte, agréable et sucrée, rappelant celle du sucre brûlé, tandis que le goût est nettement farineux et légèrement amer (Jain et *al.*, 1996). Cette plante est bien connue pour son utilisation comme espèce comestible. Les parties comestibles sont les feuilles et les graines. Ces dernières étant plus préférables, car elles contiennent des métabolites secondaires importants (Aasim et *al.*, 2018).

I.6.2.1. Nourriture humaine

L'utilisation du fenugrec comme agent aromatisant en cuisine remonte à au moins 1500 avant JC (Habtemariam, 2019). Les graines (entières, moulues, en farine ou rôties) (Petropoulos, 2002) sont principalement utilisées comme épice, dans les mélanges d'épices,

les mélanges de curry, les poudres, pour donner de la saveur aux aliments cuits, aux condiments, aux gommes à mâcher, aux cosmétiques, aux glaçages et aux assaisonnements pour les aliments cuits (Lal et *al.*, 2014) (figure 9).

➤ **Graines**

- Son utilisation varie considérablement selon les pays (Yaldiz et Camlica, 2021).
- En Inde, les graines sont utilisées dans les mélanges d'épices. Les Indiens intègrent également le fenugrec dans le Methipak, un aliment traditionnel consommé pendant la grossesse et l'allaitement (Basu et Srichamroen, 2010).
- Il est également utilisé dans diverses préparations telles que les ragoûts avec du riz (en Iran), pour aromatiser le fromage (en Suisse), dans les sirops et les boissons amères (en Allemagne), mélangé à de la farine pour faire du pain plat (en Égypte), ou encore comme substitut de café avec des grains torréfiés (en Afrique) (Das et Bhadrappura, 2017).
- Aux États-Unis, l'extrait de graines de fenugrec est l'ingrédient principal pour aromatiser le sirop d'érable simulé. Il est également utilisé comme ingrédient aromatisant du tabac et des protéines végétales hydrolysées (Basu et Srichamroen, 2010).

➤ **Feuilles**

Les feuilles fraîches et séchées des plantes, notamment le fenugrec (*Trigonella foenum-graecum* L.), servent d'aromates et d'épices dans les recettes culinaires (Bakhtiar et *al.*, 2022). Elles sont largement consommées en Inde comme légume feuillu vert (Bin-Hafeez et *al.*, 2003). Durant l'hiver, les feuilles fraîches et les tiges sont utilisées pour préparer le "methi ka saag", un légume d'hiver très réputé. Elles sont également employées pour concocter une tisane aux herbes (Singh et *al.*, 2022).



Figure 9: Produits de fenugrec dans le marché (Habtemariam, 2019 ; Sarwar et al., 2020).

I.6.2.2. Fenugrec comme fourrage

Le fenugrec a le potentiel de produire un fourrage de haute qualité adapté aux animaux ruminants. Traditionnellement utilisé comme culture fourragère dans la région méditerranéenne, son nom scientifique "*foenum graecum*" signifie "foin grec" (Alemu et Doepel, 2011). Il est souvent utilisé en remplacement des pois fourragers ou de la luzerne (Aasim et al., 2018).

Les graines germées (pousses) et les microgreens présentent des caractéristiques nutritionnelles et/ou médicinales distinctes, idéales pour le bétail. Les graines séchées, le foin, le fourrage vert et d'autres formes d'aliments pour animaux sont employés (Habtemariam, 2019).

La présence de stéroïdes dans le fenugrec le rend supérieur pour favoriser la croissance animale et réduire l'utilisation de promoteurs de croissance artificiels (Aasim et al., 2018). Moulues finement et mélangées avec des graines de coton, elles augmentent le flux de lait chez les vaches. Le fenugrec est également utilisé comme ensilage pour conserver la qualité du fourrage. En mélangeant l'herbe de fenugrec avec du foin moisi ou "sour", on rend ce dernier plus appétissant pour le bétail (Petropoulos, 2002).

I.7. Toxicité

- ❖ La plante a bénéficié d'une bonne valeur médicinale sans effets indésirables majeurs. Bien que certains cas de diarrhée, de flatulence, d'hépatite légère, de symptômes allergiques mineurs et de vertiges aient été associés au fenugrec, aucun effet indésirable grave n'a été observé (Singh et *al.*, 2022).
- ❖ Des réactions d'hypersensibilité telles que les évanouissements, la rhinorrhée et les éternuements ont été signalés après l'inhalation de la poudre de graines de fenugrec ou de l'angio-œdème du visage en utilisant la pâte de fenugrec pour guérir la pellicule. D'autres effets secondaires du fenugrec sont le risque de saignement en utilisant le fenugrec à forte dose (Aasim et *al.*, 2018). De plus, il est possible que le fenugrec augmente le risque de saignement en raison de sa présence de coumarine qui perturbe la coagulation (Oueslati et Ghédira, 2015).
- ❖ Plus récemment, un total de 7 cas d'allergie au fenugrec ont été décrits, compris l'anaphylaxie et l'asthme professionnel provoqués par l'ingestion ou l'application externe. Le fenugrec peut démontrer des réactions croisées avec d'autres plantes de la famille des légumineuses telles que les arachides (Faeste et *al.*, 2009).
- ❖ Les préparations à base de fenugrec ont la possibilité d'interagir avec d'autres médicaments administrés en même temps, notamment ceux qui ont des effets similaires ou opposés. De même, il est possible de réguler l'absorption de ces médicaments en raison d'une quantité significative de fibres mucilagineuses (Oueslati et Ghédira, 2015). L'utilisation de fenugrec avec des médicaments antidiabétiques peut entraîner une activité hypoglycémique additive. L'utilisation de cette plante pendant la grossesse est interdite en raison des effets stimulants de l'utérus (Aasim et *al.*, 2018).

Chapitre II
Composition
phytochimique de
Trigonella foenum-
graecum L.



II. Composition phytochimique de *Trigonella foenum-graecum* L.

II.1. Métabolites primaires

Les graines de fenugrec renferment une grande quantité de protéines, notamment des nucléoprotéines. Elles sont riches en graisses, minéraux (Mg, Fe), vitamines (Vitamine-A, Thiamine (B1)) et contiennent des composants médicinaux très importants tels que les glucides complexes (galactomannane) et les acides aminés (hydroxyisoleucine) (Oueslati et Ghédira, 2015). Environ 11 g de graines de fenugrec contiennent 35,5 calories (Hanif et *al.*, 2019).

Les composants de la graine et de la feuille sont donnés dans le **Tableau 3**. Selon les résultats de l'étude menée par Srinivasan (2006), il a été observé que la quantité de calcium dans les feuilles était plus élevée que dans les graines, tandis qu'une teneur élevée en protéines a été détectée dans les graines (Kara et Surmen, 2023).

Tableau 3: Composition des feuilles fraîches et des graines mures de fenugrec (Kara et Surmen, 2023).

| Composant | Fenugrec frais feuilles | Graines de fenugrec |
|-------------------|-------------------------|---------------------|
| Humidité | 86.0 g | |
| Protéines | 4.4 g | 30 g |
| Graisse | 1.0 g | 7.5 g |
| Fibre | 1.0 g | 50 g |
| Ca | 395 mg | 160 mg |
| Mg | 67 mg | 160 mg |
| Fe | 16,5 mg | 14 mg |
| Na | 76 mg | 19 mg |
| Choline | 1.35 g | 50 mg |
| Vitamine C | 52 mg | 43 mg |
| β -Carotène | 2,3 mg | 96 μ g |
| Thiamine | 40 μ g | 340 μ g |
| Riboflavine | 310 μ g | 290 μ g |
| Acide nicotinique | 800 μ g | 1,1 mg |
| Acide folique | | 84 μ g |

Valeurs exprimées pour 100g.

La composition nutritionnelle du fenugrec varie d'une région à l'autre en raison des conditions édaphoclimatiques et de récolte variable. Ses nombreux bienfaits nutritionnels en font un ingrédient polyvalent, utilisé dans divers domaines tels que l'alimentation, la médecine, les boissons, les parfums, les cosmétiques et l'industrie (Singh et *al.*, 2022). Les feuilles et les graines de fenugrec sont recommandées en raison de leur valeur hématinique. Les graines contiennent des quantités élevées de fer et la germination améliore leur teneur en vitamines A, B et C. Riches en protéines avec des acides aminés essentiels, de l'acrobate et de l'acide folique, elles possèdent des propriétés restauratrices et nutritives, et ont été associées à une augmentation de l'hémoglobine sanguine (Al-Asadi, 2014). Le fenugrec peut être utilisé comme complément alimentaire pour réguler la glycémie, même chez les personnes non diabétiques suivant un régime calorique élevé. Des études ont souligné son potentiel en tant qu'aliment fonctionnel et nutraceutique en raison de ses effets sur la glycémie et les lipides sanguins. Ainsi, la consommation de fenugrec après les repas pourrait aider à réguler la production de cholestérol dans le foie (Yadav et Baquer, 2014).

II.1.1. Glucides

Les graines de fenugrec se composent de 45 à 60 % de glucides, comprenant du saccharose, du glucose, du fructose, du myo-inositol, du galactinol et de la stachyose, des traces de galactose et de raffinose, du xylose et de l'arabinose, ce qui en fait une bonne source d'énergie (Ruwali et *al.*, 2022). Les feuilles, quant à elles, contiennent 6 % de glucides. Le mannose et le galactose sont les principaux monosaccharides de la gomme de graines de fenugrec (Naeem et *al.*, 2021).

Les jeunes graines de la plante contiennent de petites quantités de saccharose, de glucose, de fructose, de myo-inositol, de galactinol (1-0- α -D-galactopyranosyl-D-myoinositol), de stachyose et des traces de galactose et de raffinose. Deux composés contenant du galactose, la verbascose (6G-C6- α -galactosyl) 3-sucrose) et le digalactosylmyoinositol, ont été signalés dans les graines. Très peu de myo-inositol est présent dans les graines matures (Parthasarathy et *al.*, 2008).

Les galactomannanes (figure 10) ou fibres mucilagineuses sont principalement des polysaccharides hémicellulosiques présents dans les graines de fenugrec et représentent 17 à 50 % du poids sec des graines. Les galactomannanes constituent la majeure partie des parois cellulaires de l'endosperme et leur fonction principale est d'épaissir la surface de ces cellules (Zandi et *al.*, 2015). Ils sont d'une structure avec des unités de D-mannopyranose liées en β -1,

4 de manière aléatoire, avec des résidus de galactopyranose liés en α -1, 6 comme chaînes latérales (Liu et *al.*, 2020).

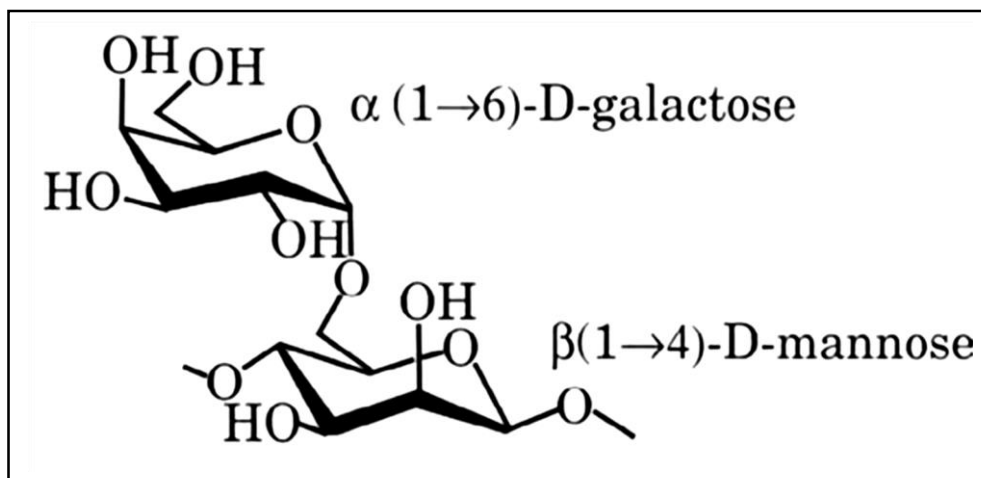


Figure 10: Galactomannane de fenugrec (Das et Bhadrapura, 2017).

II.1.2. Lipides

Les lipides dans les graines de fenugrec sont composés à 85% de lipides neutres, à 10 % de phospholipides et à 5 % de glycolipides. Le profil en acides gras est dominé par des acides gras insaturés comprenant principalement 40 % d'acide linoléique, 25 % d'acide linoléique et 25 % d'acide oléique (Peter, 2012), et un certain nombre de phospholipides importants, tels que la phosphatidylcholine et la phosphatidyléthanolamine. Les feuilles de fenugrec, comme la plupart des autres plantes photosynthétiques et des micro-organismes verts, contiennent une quantité abondante de mono- et di-galactodiacylglycérols ainsi que des glyco et phospholipides (Nagulapalli Venkata et *al.*, 2017).

L'huile extractible du fenugrec, qui représente environ 6 à 8 %, a une odeur fétide et un goût amer avec des propriétés de dessèchement marquées. Elle a une densité spécifique de 0,91, une valeur d'acide de 1 à 2, une valeur de saponification de 178 à 183, une valeur d'iode de 115, une matière insaponifiable de 3,9 %, et une composition en acides gras de palmitique 9,6 %, stéarique 4,9 %, arachidique 2 %, oléique 35,1 %, linoléique 33,7 %, et α -linoléique 13,8 % (figure 11). Environ 0,02 % est de l'huile volatile (densité spécifique 0,87) avec l'anéthole comme composant principal (Srinivasan, 2006).

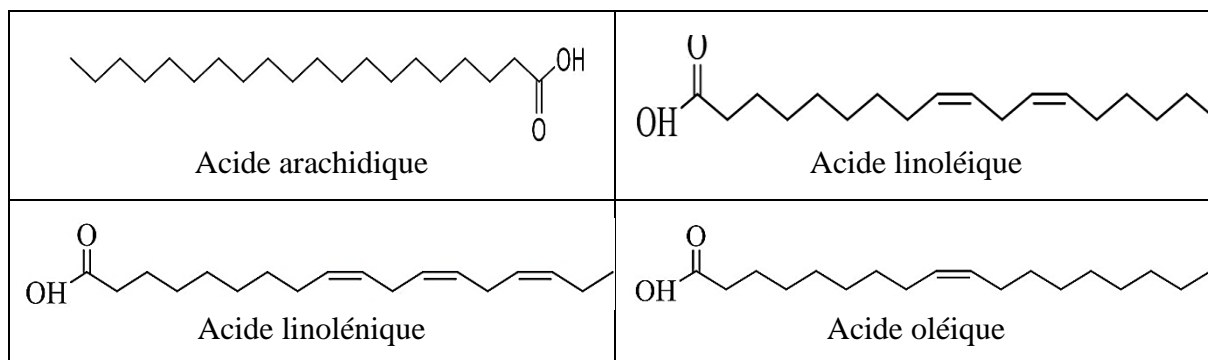


Figure 11: Composants d'huile fixe des graines de fenugrec (Habtemariam, 2019).

II.1.3. Protéines

L'endosperme de fenugrec est une source importante de protéines, comprenant la globuline, l'albumine, et la lécithine. Avec une teneur en protéines allant de 20 à 30% (Shashikumar et *al.*, 2019). Des études ont montré que 1 g de protéines de fenugrec contient 38,5 mg d'isoleucine, 53,5 mg de leucine, 51,4 mg de lysine, 5,6 mg de méthionine, 58 mg de phénylalanine, 26,6 mg de thréonine, 50 mg de valine, 19,6 mg d'histidine, 24,5 mg de tyrosine, 29,7 mg d'alanine, 82,2 mg d'acide aspartique, 115 mg d'acide glutamique, 39,8 mg de glycine, 32,1 mg de proline, 35,3 mg de sérine, 3,1 mg d'ornithine et 10,8 mg de phosphoéthanolamine (Peter, 2012).

L'acide aminé libre le plus abondant dans les graines de fenugrec est la 4-hydroxyisoleucine (figure 12) qui est présente dans l'endosperme des graines (Zandi et *al.*, 2014). Il est postulé pour être l'un des principaux composés responsables de l'activité antidiabétique du fenugrec. C'est un acide aminé non protéogénique (Das et Bhadrappura, 2017), à chaîne ramifiée qui est produit presque exclusivement dans les plantes du genre *Trigonella*. Comme son nom l'indique, la 4-hydroxyisoleucine est formée par l'hydroxylation de l'isoleucine. La formation de cet acide aminé dans le fenugrec est attribuée à l'activité de l'isoleucine hydroxylase, une dioxygénase qui catalyse l'attachement d'un atome d'une molécule d'oxygène à C-4 de l'acide aminé, tandis que l'autre atome d'oxygène est incorporé dans le 2-oxoglutarate pour produire du succinate et du dioxyde de carbone. Il est important de noter que la forme linéaire du 4-hydroxyisoleucine est nécessaire pour qu'il soit biologiquement actif (Thomas et *al.*, 2011).

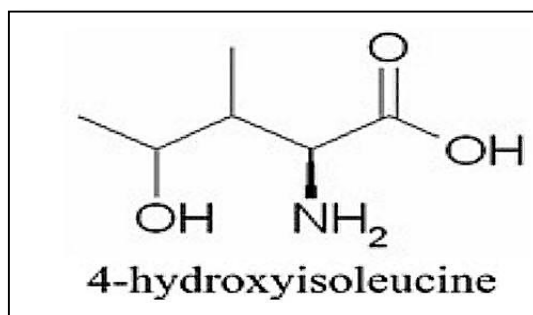


Figure 12: Structure chimique de 4-hydroxyisoleucine (Ghedira *et al.*, 2010).

II.1.4. Fibres alimentaires

Les fibres alimentaires sont des glucides complexes indigestes trouvés dans les aliments végétaux, et sont un ingrédient essentiel dans une alimentation saine. Certains sont solubles et forment un gel, tandis que d'autres forment du fourrage grossier insoluble.

Le fenugrec est endospermique. Près de 50% du poids sec des graines est une fibre alimentaire comestible, ce qui en fait la concentration la plus élevée parmi toutes les sources naturelles de fibres (Srinivasan, 2006). Il contient 32 % de fibres solubles et 13 % de fibres insolubles. Les fibres qui sont solubles se décomposent dans le milieu aqueux du tractus gastro-intestinal de l'homme, mais les fibres qui ne sont pas solubles ne digèrent pas par l'enzyme (Amalraj *et al.*, 2022). En particulier, les fibres comprennent la cellulose, l'hémicellulose ; les mucilages comprennent le galactomannane et la phytine (hexaphosphate d'inositol de Ca et de Mg) (Ghedira *et al.*, 2010).

Les fibres insolubles adoucissent les selles et diminuent l'appétit ; tandis que les fibres solubles inhibent l'absorption du glucose dans la circulation sanguine et améliorent son contrôle glycémique (Mahbub *et al.*, 2018). Les fibres alimentaires dérivées du fenugrec pourraient être utilisées dans l'industrie alimentaire en tant qu'agent émulsifiant et stabilisant. En boulangerie, une farine enrichie en 8 à 10 % de fibres alimentaires de fenugrec est utilisée pour produire des produits de boulangerie tels que le pain, la pizza, les muffins et les gâteaux, qui peuvent être utilisés comme aliments fonctionnels pour améliorer la valeur nutritionnelle des régimes occidentaux (Yadav et Baquer, 2014).

II.1.5. Vitamines

Le fenugrec est riche en quelques vitamines (**Tableau 4**) telles que la thiamine, la riboflavine, l'acide nicotinique, le carotène, l'acide folique, la pyridoxine, la cyanocobalamine, le pantothénate de calcium, la biotine, la vitamine A, B1, B2 et C (Ruwali *et al.*, 2022). Cependant, le processus de séchage réduit les vitamines de plus de 80 % (Subhasish et

Dhananjaya, 2017). La farine contient (pour 100 g): 0,06 mg de thiamine, 0,05 mg de riboflavine et 1,5 mg de niacine. Des études sur la localisation de la vitamine C dans les différentes parties du *T.foenum-graecum* L. ont montré que les feuilles et les tissus à croissance rapide contenaient environ 80 % de la teneur totale en vitamines, tandis que les tiges et les racines donnaient des valeurs faibles (Petropoulos, 2002).

Tableau 4: Profil vitaminique et ses concentrations respectives dans le fenugrec (Visuvanathan *et al.*, 2022).

| Vitamines | Partie de la plante | Unités | Valeur / 100g |
|-------------------|---------------------|---------|---------------|
| Acide ascorbique | Graine | mg | 12–23 |
| Acide ascorbique | Feuilles | mg | 52,0 |
| Pyridoxine | Graine | mg | 0,60 |
| Rétinol | Graine | UI | 60–100 |
| Niacine | Graine | mg | 6,0 |
| β -carotène | Graine | μ g | 96 |
| β -carotène | Feuilles | mg | 2,3 |
| Thiamine | Graine | μ g | 340 |
| Thiamine | Feuilles | μ g | 40 |
| Riboflavine | Graine | μ g | 290 |
| Riboflavine | Feuilles | μ g | 310 |
| Acide folique | Graine | μ g | 84 |

II.1.6.Minéraux

La plante de fenugrec est bien approvisionnée en éléments inorganiques essentiels (Tableau 5). Elle est une bonne source d'éléments alimentaires majeurs, tels que Fe, Ca, P, S et Mg. Les graines contiennent des quantités adéquates d'importants éléments alimentaires traces tels que Co, Cu, Mn, Zn et Br (Nagulapalli Venkata *et al.*, 2017). La farine contient 213 mg de Ca, 270 mg de P et 32,4 mg de Fe. Les feuilles crues contiennent 150 mg de Ca et 48 mg de P pour 100 g. La teneur en strontium (Sr) a été trouvée à moins de 100 μ g/g de poids sec (Petropoulos, 2002). Il a également été rapporté que le curry (plat) fait à partir de fenugrec contient une grande quantité de calcium, de fer et de zinc (Naeem *et al.*, 2021).

Le potassium et le sodium sont importants pour la transduction de l'impulsion nerveuse et le maintien de l'homéostasie chez les mammifères, tandis que d'autres ions métalliques sont également importants dans divers autres métabolismes cellulaires et dans la

signalisation cellulaire (Das et Bhadrapura, 2017). Comme les oligo-éléments agissent en tant que catalyseurs dans les réactions biochimiques des cellules vivantes et sont essentiels dans l'alimentation des animaux et des êtres humains, leurs niveaux dans le fenugrec ont été estimés (Petropoulos, 2002).

Tableau 5: Minéraux présents dans les graines de fenugrec (Subhasish et Dhananjaya, 2017).

| Minéraux | Quantité par 100 g |
|----------|--------------------|
| P | 290-370 mg |
| Mg | 140 mg |
| Ca | 60-175 mg |
| Fe | 12-34 mg |
| Zn | 7 mg |
| Cu | 1,3 mg |
| Mn | 1 mg |
| Na | 1,1 mg |
| K | 0,35 mg |
| Cr | 0,1 mg |

II.2. Métabolites secondaires

L'analyse phytochimique du fenugrec a révélé la présence de différentes catégories de métabolites secondaires (Nagulapalli Venkata et *al.*, 2017), comme les alcaloïdes, les saponines, les flavonoïdes, les stéroïdes et les coumarines (figure 13) (Kumar et *al.*, 2024). Alors que les graines de fenugrec sont l'utilisation la plus connue de la plante, il a également été dit que les tiges et les feuilles ont des bienfaits thérapeutiques. Ces caractéristiques sont le résultat de la teneur en métabolites secondaires, ou phytochimiques, de la plante de fenugrec (Ghevariya et *al.*, 2023). La littérature a révélé que les saponines, le glycoside-D et le trigofenoside-A sont les principaux composants des graines, tandis que les alcaloïdes, les glycosides cardiaques et les phénols sont présents dans l'extrait de feuilles (Savita et *al.*, 2008). Tous ces composés sont classés comme biologiquement actifs car ils ont des effets pharmacologiques sur le corps humain lorsqu'ils sont ingérés (Shashikumar et *al.*, 2019).

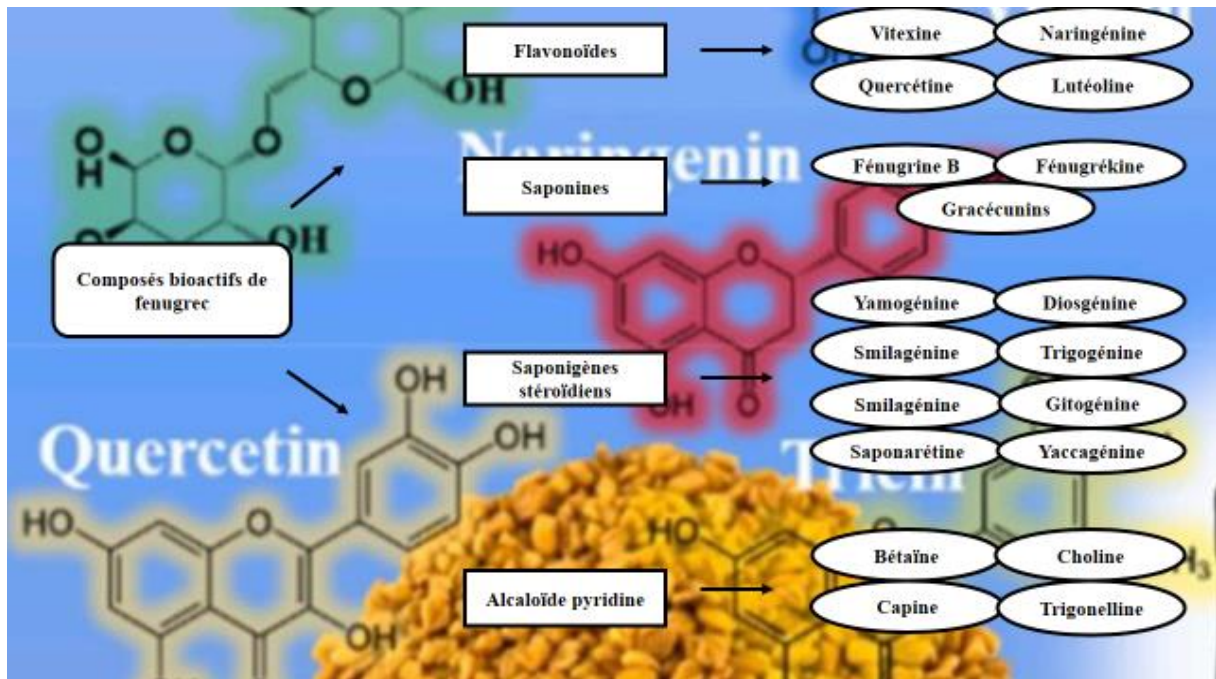


Figure 13: Les composés bioactifs de fenugrec (Naeem et al., 2021 ; Goyal et al., 2022).

II.2.1. Phytochimie des feuilles, racine et de la tige

Les feuilles de fenugrec sont réputées pour avoir une meilleure rétention nutritionnelle et sont riches en flavonoïdes, des composés naturels trouvés dans de nombreux légumes (Shams et al., 2022).

La revue de Petropoulos (2002) a excellemment résumé les composés phénoliques suivants isolés à des concentrations variables à partir des racines, de la tige, des feuilles et/ou de la plante entière: scopoletine, acides chlorogénique (figure 14), caféique et p-coumarique, ligning-schisandrine, hymécromone (4-méthyl-7-acétoxy coumarine), trigoforine (3,4,7-triméthyl-coumarine) et trigocoumarine (3(éthoxycarbonyl)méthyl-4-méthyl-7,8-diméthoxycoumarine) (Habtemariam, 2019).

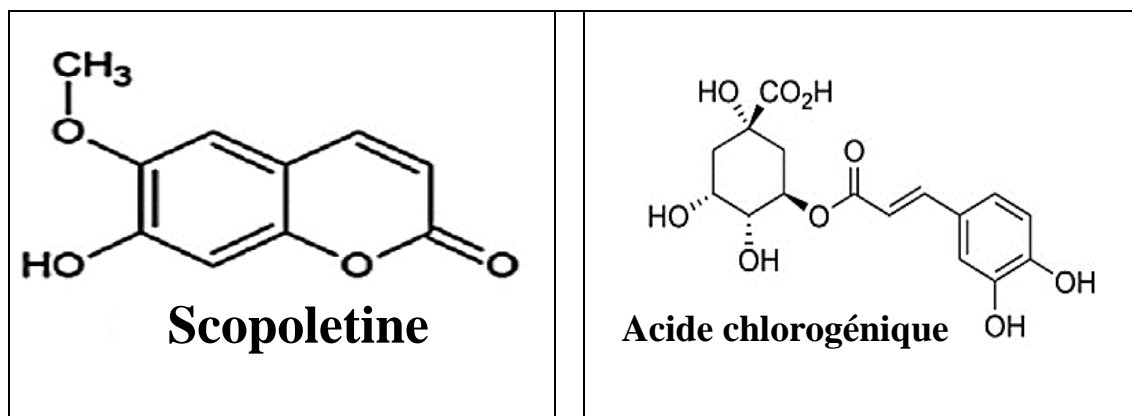


Figure 14: Structure chimique de scopoletine, acide chlorogénique (El Bairi et al., 2017 ; Ahmed et al., 2023).

À partir des feuilles de fenugrec, cinq saponines spirostanoliques ont été isolées et nommées graécunine B, C, D, E et graécunine G présentée dans la figure 15. Deux composés traces, nommés graécunine A et F, ont également été isolés en quantités trop faibles pour être caractérisés (Petropoulos, 2002). Pour cette raison, l'extrait et les feuilles de fenugrec (généralement riches en saponines) doivent être contre-indiqués chez les femmes en début de grossesse pour éviter le risque de perte fœtale, et pendant les règles pour réduire le risque de saignement excessif (Srinivasan, 2006).

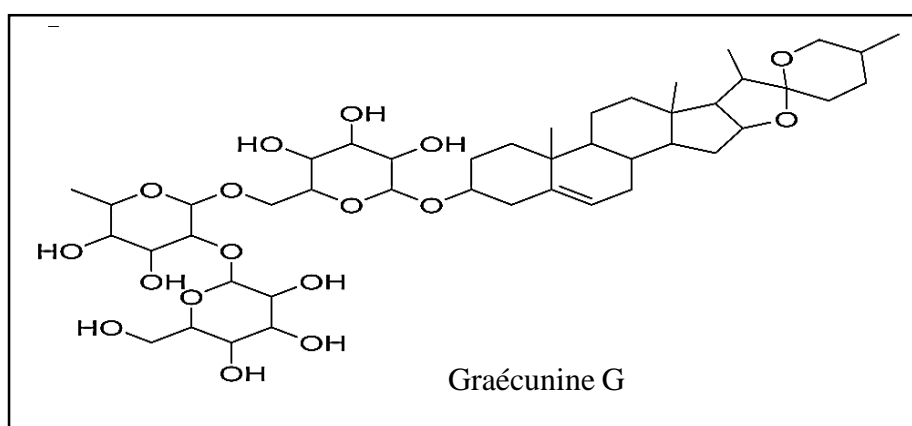


Figure 15: Structure chimique de graécunine G (Pal et Mukherjee, 2020).

La tige de la plante de fenugrec contient des alcaloïdes tels que la trigocoumarine (figure16), l'acide nicotinique, la triméthylcoumarine et la trigonelline (Gayyur et al., 2021). Les feuilles contiennent de l'alcaloïde (trihonelline), des acides carboxyliques et des huiles volatiles (Shaukat et al., 2023).

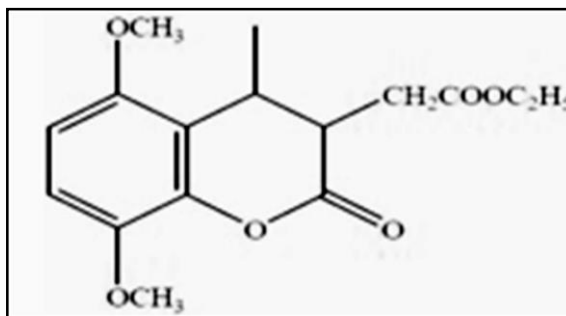


Figure 16: Structure chimique de trigocoumarine (Mahbub et al., 2018).

II.2.2. Phytochimie des graines

Les constituants chimiques des graines varient remarquablement en fonction de leurs facteurs variétaux et écologiques (figure 17) (Zandi et al., 2015).

Les graines de fenugrec contiennent de la rigogénine, de la néorigogénine, de la diosgénine, de la yamogénine et de la gitogendine. La teneur en diosgénine des graines de fenugrec varie de 0,78 à 1,9 %, selon les génotypes et les pratiques culturelles (Lal et al., 2014). De nombreux types de composés volatils ont été identifiés dans les graines de fenugrec, mais l'A-sitostérol et la dextroamphétamine sont connus pour être dominants (Naeem et al., 2021). En outre, les volatils et les alcaloïdes des graines de fenugrec produisent un goût et une odeur désagréable, ce qui fait que les gens essaient d'éviter de les consommer (Kara et Surmen, 2023). Les graines sont également connues pour contenir des flavonoïdes, des caroténoïdes, des coumarines et d'autres composants avec des valeurs LD50 très faibles. Dans une étude de Joshi et al. (2009), la teneur phénolique totale des graines de fenugrec varie de 38 à 41 mg/g de GAE, tandis que la teneur en flavonoïdes varie de 1,2 à 2,3 mg/g de QE (Malhotra, 2011). Il a été rapporté que les graines de fenugrec contenaient une faible quantité d'huile essentielle et d'huile grasse (Yaldiz et camlica, 2021).

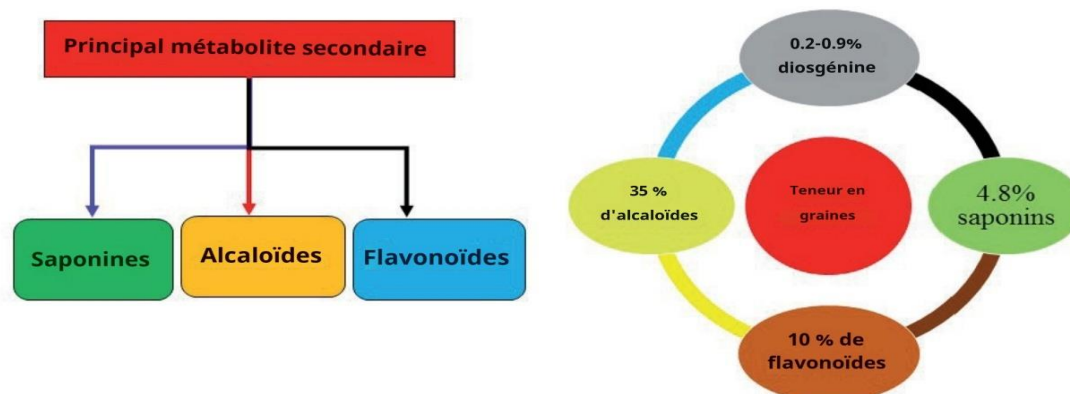


Figure 17: Principaux métabolites secondaires et contexte des graines de fenugrec (Yaldiz et camlica, 2021).

II.2.2.1. Composés stéroïdiens et saponines

Parmi les phytoconstituants présents dans le fenugrec, la saponine est la plus abondante. Le fenugrec contient 4 à 8 % de saponines. Diosgénine est la principale sapogénine largement utilisée dans les industries pharmaceutiques et nutraceutiques. Sa synthèse est principalement à partir du cholestérol, presque dans toutes les plantes. Après hydrolyse acide, les sapogénines présentes sont la diosgénine et la yamogénine (Amalraj et *al.*, 2022). Elles sont les portions d'aglycone des saponines dérivées de stéroïdes d'origine végétale, contenant des anneaux de 6-C avec 2 à 3 chaînes latérales substituables soit avec les groupes méthyl ou hydroxyle. Les saponines sont des glycosides amphipatiques, contenant à la fois des molécules de glycoside hydrophile et des triterpènes lipophile, donc capables de produire des propriétés de mousse semblables au savon. Diosgénine, un composé stéroïdien 27-C, est actuellement utilisé comme matière première pour la fabrication de contraceptifs oraux et d'hormones sexuelles par l'industrie pharmaceutique (Thomas et *al.*, 2011).

La diosgénine s'est révélée bénéfique dans plusieurs conditions pathologiques, notamment le diabète, l'hyperlipidémie, le cancer, les maladies cardiovasculaires, le stress oxydatif et l'inflammation. Consistant en une fraction de sucre hydrophile liée à un stéroïde hydrophobe aglycone (figure 18) (Das et Bhadrappura, 2017). La diosgénine est impliquée dans la production d'hormones humaines. C'est un précurseur de l'œstrogène et utilisé comme médicament stéroïde, et il aide également à gérer la ménopause (Amalraj et *al.*, 2022).

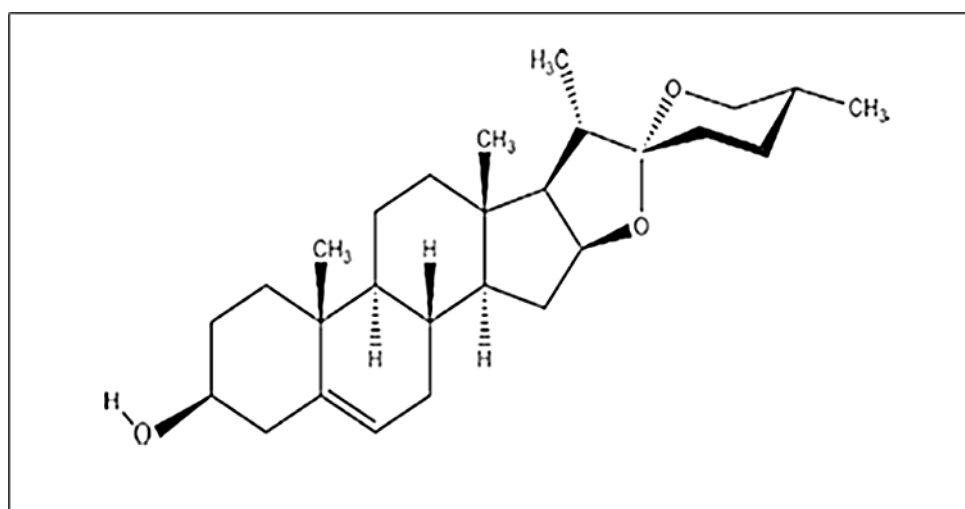


Figure 18: Structure chimique de la diosgénine (Arya et *al.*, 2023).

II.2.2.2. Alcaloïdes

L'endosperme de fenugrec contient 35% d'alcaloïdes (Neurine, Triméthylamine, Trigonelline, Choline, Carpaine, Gentianine et Bétaine), principalement de trigonelline

(Shashikumar et *al.*, 2019). Chimiquement connu sous le nom d'acide nicotinique N-méthyl (Figure 19). C'est un ion de zwitter formé par la méthylation de l'atome N de la niacine (Subhasish et Dhananjaya, 2017). Ce composé (formule chimique $C_7H_7NO_2$) a été signalé pour exercer une légère hypoglycémie et anti-pellagra (Thomas et *al.*, 2011).

La trigonelline (TRL) peut activer les récepteurs de l'œstrogène, de sorte qu'elle est également classée comme un phytoestrogène (Amalraj et *al.*, 2022). La synthèse de la trigonelline dans les graines est beaucoup plus faible que dans les péricarpes ; cependant, sa teneur à l'intérieur des semences est significativement plus élevée que dans le péricarpe. En d'autres termes, des parties de la trigonelline synthétisée dans les péricarpes sont éventuellement transmises aux graines pour être utilisées à des stades ultérieurs pendant la germination (Zandi et *al.*, 2015). Il a été démontré que le TRL abaisse le taux de cholestérol dans le sang, favorise la régénération nerveuse et exerce des propriétés anti-cancer et sédatives, mais son effet sur la voie AMPK et l'autophagie dans les cellules glomérulaires mesangiales dans un état de glucose élevé reste peu clair (Chen et *al.*, 2021).

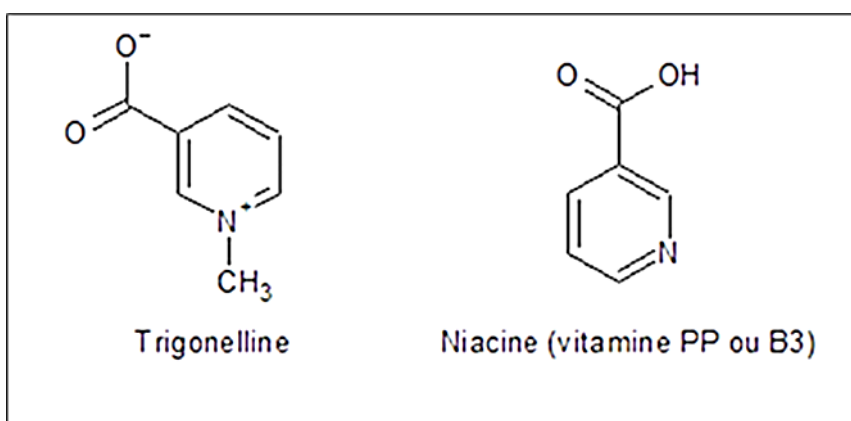


Figure 19: La trigonelline présente dans les graines de fenugrec et la vitamine PP dont elle est le précurseur (Rouag, 2021).

II.2.2.3. Flavonoïdes

Parmi les nombreux flavonoïdes rapportés dans le fenugrec, la quercétine, la lutéoline, la vitexine et le kaempférol qui semblent être les plus communs (Figure 20). La quercétine et le kaempférol sont des flavonols ; la lutéoline est une flavone tandis que la vitexine est une flavone glycosylée. Ces composés jouent un rôle clé dans le maintien de la santé des plantes en cas d'invasion microbienne. Les flavonoïdes ont une structure chimique de base à trois anneaux, c'est-à-dire deux anneaux aromatiques (A et B) couplés à un anneau hétérocyclique oxygéné à trois carbones (C) (Thomas et *al.*, 2011).

Tous ces composés sont classés comme biologiquement actifs, car ils ont des effets pharmacologiques sur le corps humain. Leur utilisation devrait, de cette manière, être élevée dans l'alimentation quotidienne pour surveiller l'hypercholestérolémie, la malignité et le diabète sucré, car ils ont des propriétés hypoglycémiques, antilipidémiques, anticancérigènes et cholagogues (Shashikumar et *al.*, 2019).

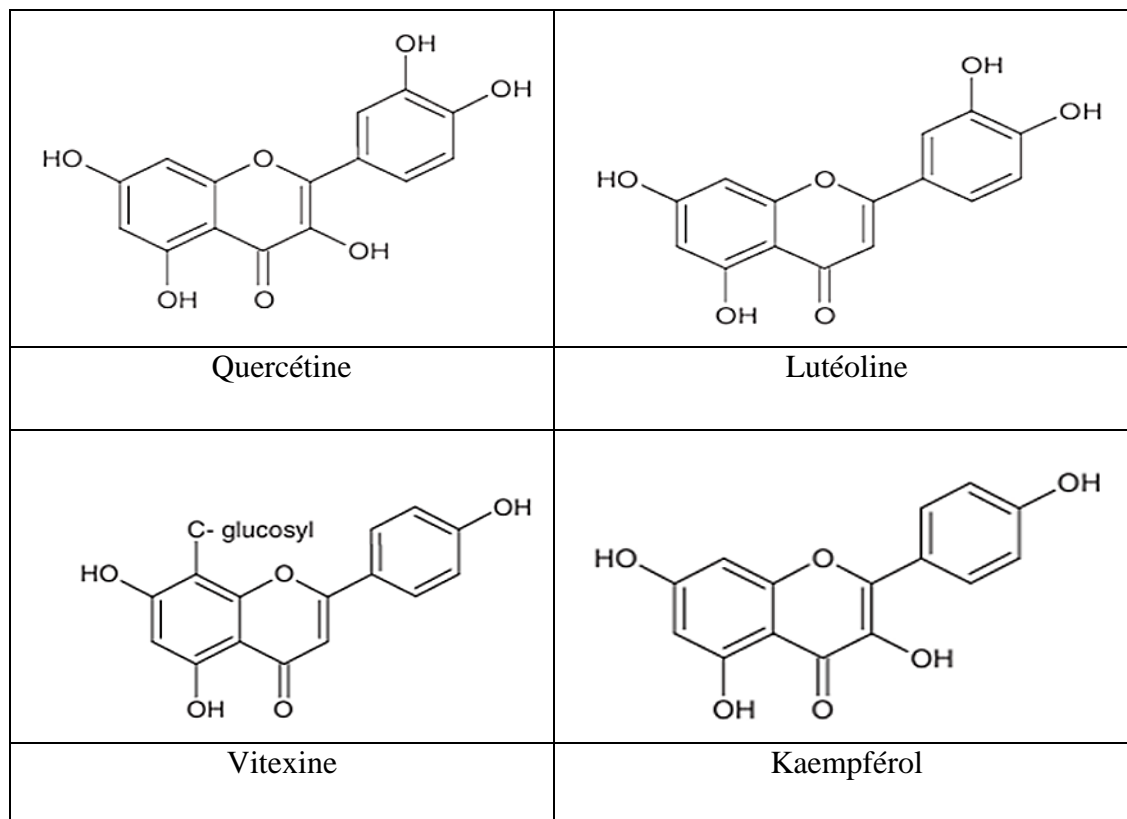


Figure 20: Flavonoïdes du fenugrec (Parthasarathy et *al.*, 2008).

II.2.2.4. Coumarine

L'un des composés bioactifs les plus bénéfiques dans les graines de fenugrec est la coumarine. Un large éventail de constituants, y compris l'acide lactone orthodihydroxycinnamique et la scopoletine, sont des sous-ensembles de la coumarine. Ces composants peuvent jouer un rôle très efficace dans l'amélioration de l'efficacité des anticoagulants comme la warfarine. En fait, la présence de ces composés réduit l'accumulation de plaquettes dans les vaisseaux sanguins dans lesquels cette agrégation peut augmenter le risque de saignement d'une personne (Naeem et *al.*, 2021).

Chapitre III

Activité biologiques de *Trigonella foenum- graecum* L.



III. Activités biologiques de *Trigonella foenum-graecum* L.

Les constituants actifs du fenugrec ont été rapportés comme ayant des effets protecteurs contre des maladies (Figure 21) telles que le diabète, les troubles neurodégénératifs, diverses complications cardiaques, le cancer, les effets hypolipémiants, gastroprotecteurs et l'arthrite (Varshney et Siddique, 2023).

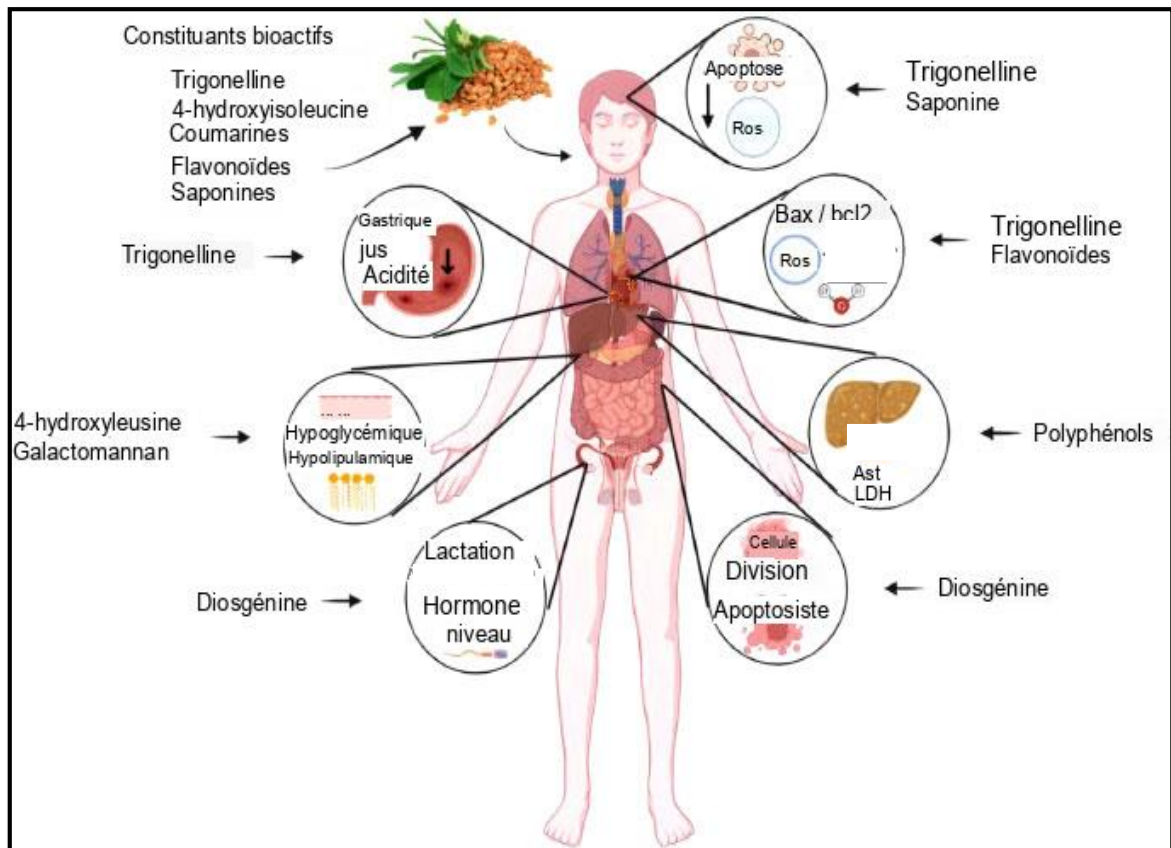


Figure 21: Effets pharmacologiques des composants bioactifs du fenugrec (Varshney et Siddique, 2023).

III.1. Activité anticancéreuse

Le cancer est un trouble génétique caractérisé par une division cellulaire incontrôlée (Singh et *al.*, 2022). C'est une grave préoccupation pour les associations médicales car il est la principale cause de mortalité dans le monde entier (Ruwali et *al.*, 2022). De nombreuses études ont démontré l'effet protecteur des graines de fenugrec dans les modèles expérimentaux de cancer à l'aide de lignes cellulaires ou d'animaux d'expérience (Rahal et *al.*, 2023) (Figure 22).

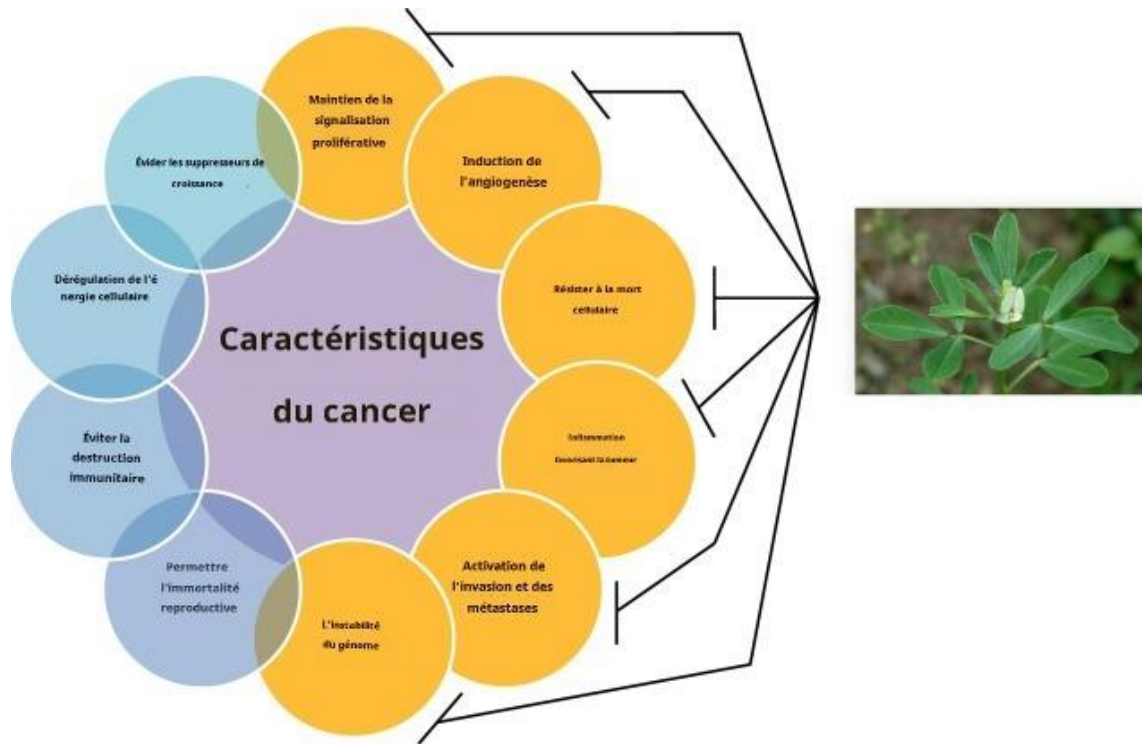


Figure 22: Principales caractéristiques du cancer ciblées par les extraits de fenugrec et les composés bioactifs (El Bairi et *al.*, 2017).

Les composants chimiques du fenugrec possédant une activité anticancéreuse sont les phytoestrogènes et les saponines. Les saponines inhibent sélectivement la division cellulaire dans les cellules tumorales et peuvent également activer des programmes apoptotiques qui peuvent conduire à la mort cellulaire programmée (Goyal et *al.*, 2016).

L'apoptose est un type de mort cellulaire (Ghosh et *al.*, 2015), caractérisée par le rétrécissement cellulaire, le blebbing de membrane, la condensation de chromatine, et la formation d'une échelle d'ADN avec des fragments multiples de 180-200 bp causés par la fission de l'ADN inter-nucléosomique.

L'effet de l'extrait de fenugrec sur plusieurs maladies noplastiques a été étudié. Les flavonoïdes et les catéchines ont montré un effet apoptotique dans les lignes cellulaires des tumeurs pulmonaires, les cellules du carcinome humain, le cancer du côlon et de la prostate, la cellule du cancer du sein, celle du cancer de l'estomac, celle de la tumeur du cerveau, le carcinôme squameux de la tête et du cou, la leucémie, la maladie du col utérin et le mélanome (Alizadeh et *al.*, 2009).

La protodioscine, une saponine de furostanol isolée du fenugrec, induit également des changements apoptotiques menant à la mort dans une ligne cellulaire leucémique (HL-60). Plusieurs études sur les propriétés anticancéreuses des composants chimiques du fenugrec ont été faites et ont montré des résultats positifs. Certains constituants des alcaloïdes, appelés "trigonelline", ont révélé le potentiel d'utilisation dans la thérapie du cancer (Goyal et al., 2016).

Une étude a évalué l'effet antinéoplasique de l'extrait de graine de *Trigonella Foenum Graecum* dans le modèle Ehrlich Ascites Carcinoma (EAC) chez des souris Balb-C. L'administration intrapéritonéale de l'extrait d'alcool de la graine a conduit à une inhibition de plus de 70% de la croissance des cellules tumorales par rapport au contrôle (Alizadeh et al., 2009).

Abas et Naguib (2019) ont signalé que l'extrait de fenugrec peut augmenter l'expression de la caspase-3, 6, l'arrêt du cycle cellulaire, la fragmentation de l'ADN et l'activité enzymatique du LDH (marqueur apoptotique) dans les cellules cancéreuses. L'extrait a également provoqué la détérioration de la membrane cellulaire et a par conséquent libéré le contenu cellulaire à l'extérieur de la cellule (Singh et al., 2022).

III.1.1. Cancer du sein

Amin et coll. (2005) ont montré que l'extrait de graines de fenugrec inhibe significativement l'hyperplasie mammaire induite par le 7,12-diméthylbenz(a)anthracène et réduit son incidence chez les rats et ils ont suggéré que les effets protecteurs du fenugrec contre le cancer du sein pourraient être dus à une apoptose accrue.

Sebastian et Thampan (2007) ont examiné l'effet des extraits aqueux et d'éthanol de fenugrec sur la croissance des cellules MCF-7, une ligne de cellules du cancer du sein positif au récepteur d'œstrogène, et ont rapporté que l'extrait d'éthanol de Fenugrec réduisait la viabilité cellulaire et induisait des changements apoptotiques précoces tels qu'inversion de la phosphatidylserine et diminution du potentiel de membrane mitochondriale. L'analyse du cycle cellulaire a révélé une population apoptotique sous-G1 ainsi que l'arrêt du cycles cellulaires à la phase G2/M dans les cellules extraites de fenugrec impliquant le rôle de l'apoptose induite par l'extrait de fenugrec dans son rôle anticancéreux (Yadav et Baquer, 2014).

III.1.2. Cancer de colon

Des chercheurs ont indiqué l'effet préventif de la graine de fenugrec alimentaire et de son principal constituant stéroïdien de la saponine et de la diosgénine, sur la cancérogenèse du côlon de rat induite par l'azoxyméthane au cours des stades d'initiation et de promotion (Alizadeh et *al.*, 2009).

Une autre étude a également rapporté l'apoptose induite par la diosgénine dérivée de *Trigonella* dans les cellules cancéreuses du côlon humain HT-29 en inhibant bcl-2 (protéine proapoptotique) et en induisant l'expression de la protéine caspase-3, une protéine anti apoptotique, suggérant son potentiel en tant qu'agent préventif du cancer du côlon (Yadav et Baquer, 2014).

III.1.3. Cancer Pancréatiques

Une étude a été menée par Almalki & Naguib impliquant la ligne de cellules cancéreuses pancréatiques BXPC-3 et des souris albinos. Les données ont montré que l'extrait de graines de fenugrec germiné aqueux était efficace contre les lignes cellulaires BXPC-3, avec une IC50 de 25 g/ml. Dans l'enquête *in vivo*, l'histopathologie a révélé que le groupe traité par le fenugrec avait un meilleur tissu pancréatique avec des lésions très mineures que les groupes non traités. En outre, le groupe de souris traité a montré un taux de survie accru (Visuvanathan et *al.*, 2022).

III.1.4. Cancer hépatique

La diosgénine a été montré pour moduler la cascade de signalisation STAT3 dans le cancer hépatocellulaire en entravant l'activation de c-Src, JAK1 et JAK2 (Ruwali et *al.*, 2022). La diosgénine a également régulé l'expression de divers gènes régulés par le STAT3, inhibant la prolifération et potentialisant les effets apoptotiques du paclitaxel et de la doxorubicine, ce qui suggère que la diosgénine pourrait être une option thérapeutique nouvelle et potentielle pour le carcinome hépatocellulaire et d'autres cancers (Yadav et Baquer, 2014).

III.2. Activité hypoglycémiante

Le fenugrec n'est plus considéré comme un simple remède populaire depuis quelques années. Le bénéfice thérapeutique du fenugrec dans le traitement de nombreux problèmes de santé a été démontré dans de nombreux essais *in vitro*, *in vivo* et cliniques. Il

a été démontré que le fenugrec a des propriétés anti-hyperglycémiques chez les humains et les animaux. Cependant, le mécanisme exact d'action du fenugrec dans la production de cet effet est encore inconnu (Visuvanathan *et al.*, 2022).

Le diabète est un trouble métabolique complexe caractérisé par l'augmentation des niveaux de glucose, la résistance à l'insuline et la sécrétion et l'action inappropriées de l'insuline (Singh *et al.*, 2022). Il existe deux principaux types de diabète qui sont: le diabète de type 1 et de type 2. Les patients atteints de diabète de type 1 présentent un état de carence en insuline en raison d'un défaut grave de la fonction des cellules β de l'île, alors que les patients souffrant de diabète de type 2 présentent une combinaison de résistance à l'action de l'insuline et d'insuffisance de la sécrétion d'insuline (Wissem et Brahim, 2016).

Les effets hypoglycémiques du fenugrec ont été attribués à plusieurs mécanismes (figure 23).

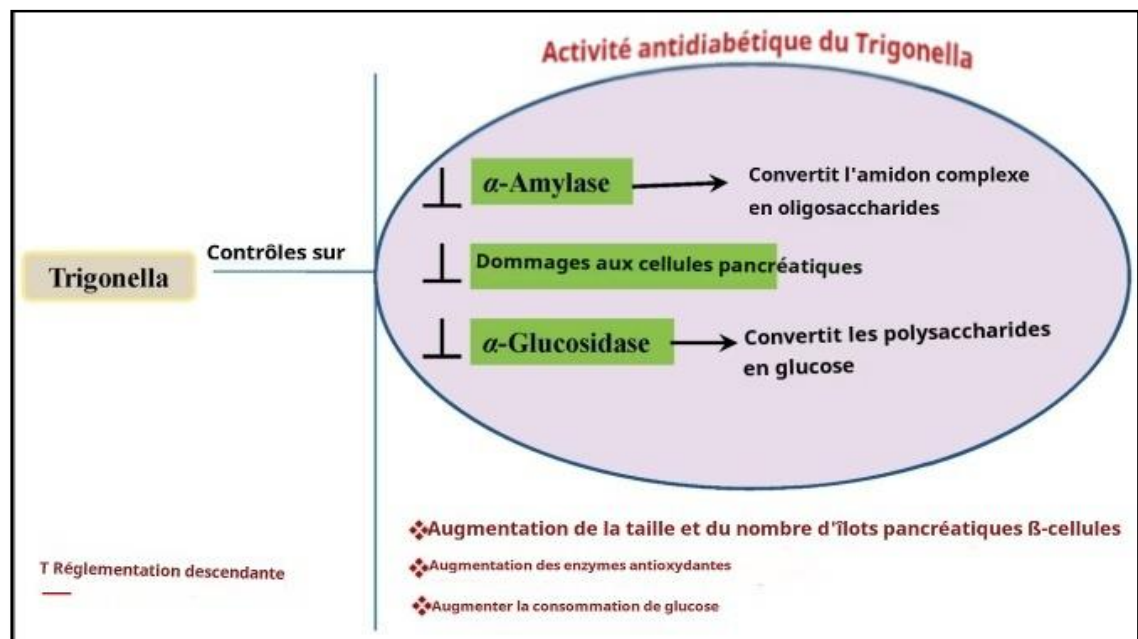


Figure 23: Activité antidiabétique de la trigonella (Singh *et al.*, 2022).

Les scientifiques travaillent depuis plusieurs années à découvrir le principe actif dans les graines de fenugrec qui est responsable de son action antidiabétique et ont mis au point de nombreuses théories. Selon quelques-uns, le principe actif était un trigonelline. Mais cette théorie a été rejetée car la trigonelline n'a pas réussi à abaisser les niveaux de glucose dans le sang chez les sujets humains. Toutefois, la théorie la plus convaincante est la présence d'une substance chimique appelée 4-Hydroxyleucine. Ce produit chimique stimule la libération d'insuline chez les diabétiques en présence de taux modérés à élevés de glucose dans le sang. Le mode d'action de la substance chimique est censé être dû à une certaine

influence sur le canal K⁺ des cellules de l'îlot pancréatique. Il inhibe, en outre, l'action des enzymes saccharose α -D-glucosidase et α -amylase (figure 24) (Basu et *al.*, 2014).

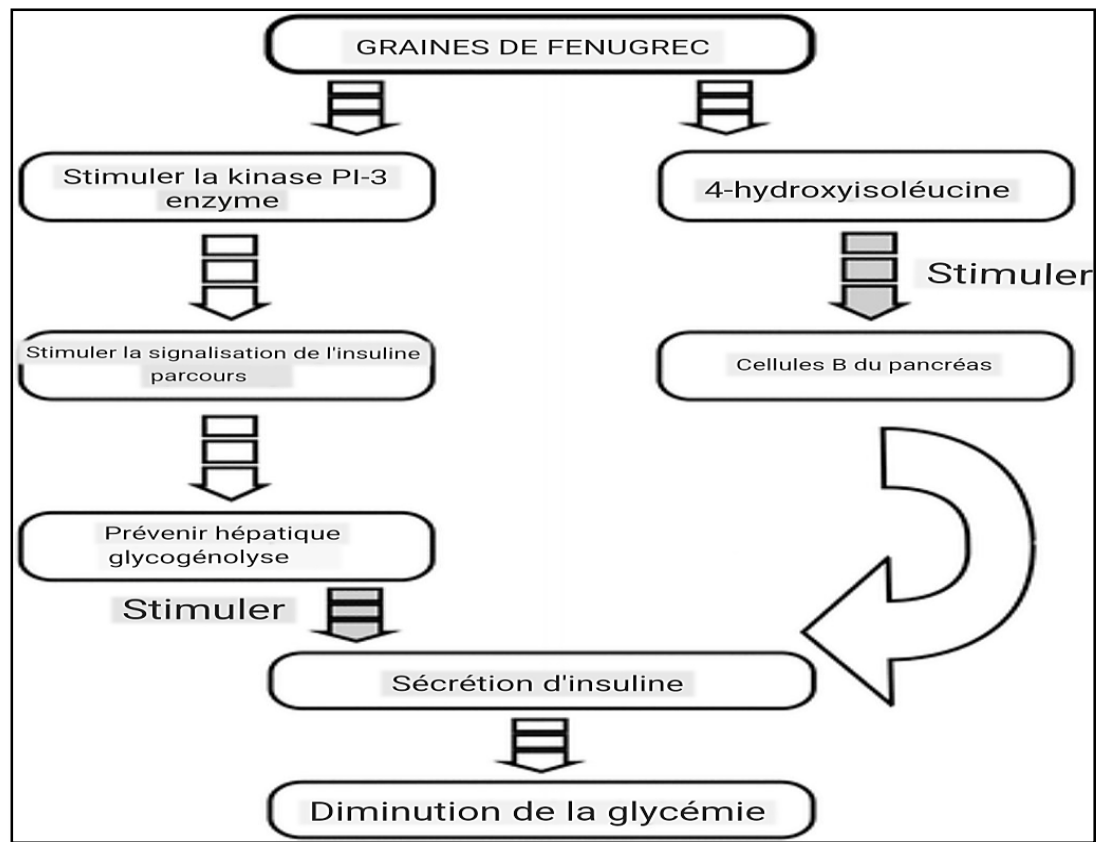


Figure 24: Mécanisme d'action des graines de fenugrec dans le contrôle du diabète (Zandi et *al.*, 2015).

Avec l'intérêt accru pour l'application potentielle du fenugrec dans le syndrome métabolique, la diosgénine est apparue comme l'un des composants actifs les plus importants présents dans ses graines.

Les mécanismes d'action attribués à la diosgénine dans l'amélioration du diabète induit expérimentalement comprennent la restauration des cellules du pancréas, la régulation des enzymes impliquées dans la gluconéogenèse hépatique et l'exportation de glucose et la réglementation du glucokinase hépatiques (Das et Bhadrapura, 2017).

Le rôle des fibres alimentaires présentes dans l'endosperme des graines de fenugrec ne peut pas être également sous-estimé (Basu et *al.*, 2014) car il agit pour diminuer le taux de vidange gastrique retardant ainsi l'absorption du glucose de l'intestin grêle. La fibre soluble dans l'eau augmente la viscosité intestinale et inhibe ensuite l'absorption du glucose (kor et *al.*, 2013). Cependant des études réalisées *in vitro* et *in vivo* ont montré que d'autres constituants de la graine tels la 4-hydroxy-isoleucine, le galactomannane et la saponine,

abaissent la glycémie et agissent en synergie pour inhiber l'absorption du glucose et promouvoir les fonctions pancréatiques (Oueslati et Ghédira, 2015).

Bien que plusieurs recherches menées à maintes reprises ont démontré les propriétés antidiabétiques du fenugrec, pourtant aucun algorithme ou protocole ne pouvait être fourni pour l'utilisation de cette plante comme le traitement de choix. C'est simplement un agent complémentaire aux médicaments conventionnels pour contrôler le diabète (Basu et *al.*, 2014).

III.3. Activité hypolipidémiante

Des taux élevés de LDL et de cholestérol de lipoprotéines de très faible densité (VLDL) sont associés à l'athérosclérose ou à la plaque dans les vaisseaux sanguins. Une réduction des niveaux de cholestérol LDL est considérée comme importante pour réduire le risque d'attaque cardiaque. Le fenugrec alimentaire a été trouvé pour être hypocholesterolémique dans un certain nombre d'études animales ainsi que quelques essais cliniques (Srinivasan, 2006).

Une étude a été réalisée pour observer les effets du fenugrec sur le taux de cholestérol lorsque des lapins albinos étaient nourris avec du fenugrec séché. Ils se sont avérés avoir des niveaux réduits de cholestérol sanguin total, de lipoprotéine de basse densité (LDL) et de lipoprotéine de très basse densité (VLDL) avec un impact appositif sur les lipoprotéines de haute densité (HDL). Les graines de fenugrec contiennent une bonne quantité de fibres de galactose et de mannose qui sont liées à la réduction de la cholestérolémie (Ruwali et *al.*, 2022).

La teneur en fibres des graines de fenugrec est ce qui semble réduire le taux de production de cholestérol dans le foie (figure 25). La fibre soluble diminue également la réabsorption des acides biliaires dans l'intestin, ce qui augmente la quantité de cholestérol et d'acides bileux excrétés par la défécation. En conséquence, il y a une augmentation du besoin de cholestérol pour la biosynthèse de l'acide biliaire. Ainsi, le corps se tourne vers l'utilisation du cholestéroïde sanguin (Visuvanathan et *al.*, 2022).

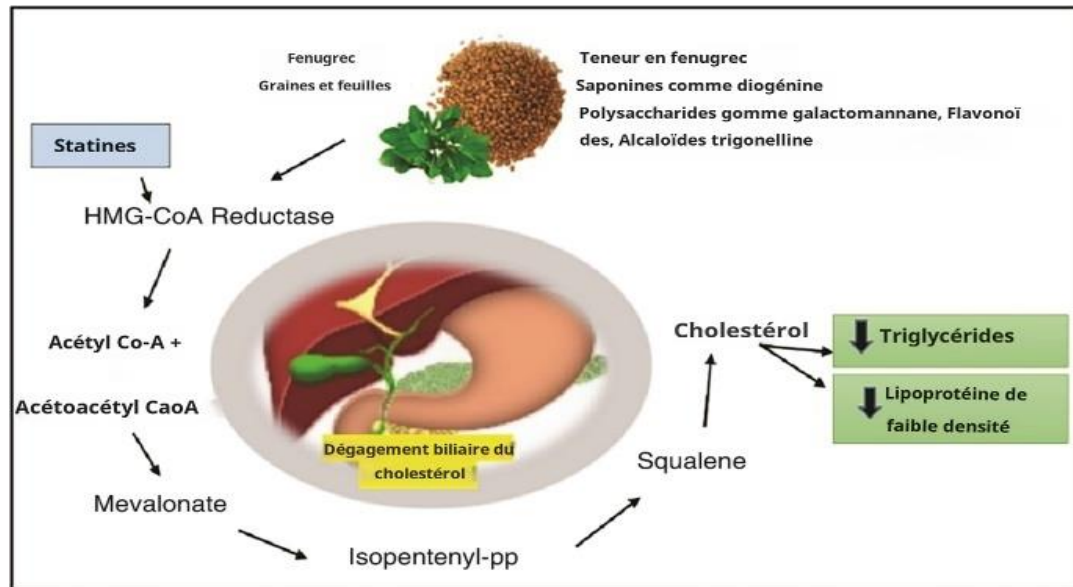


Figure 25: Effet de réduction du cholestérol du fenugrec (Ahmad et al., 2023).

La partie contenant des fibres est hypocholestérolémiant, tandis que la partie contenant des saponines agit sur les deux lipides pathogènes présents dans le sang. Dans l'intestin, les saponines pourraient également se combiner avec le cholestérol et diminuer son absorption. Les fibres de fenugrec peuvent également restreindre cette absorption en réduisant la diffusion vers la muqueuse (Ghedira et al., 2010).

III.4. Activité anti-inflammatoire

L'inflammation est la réponse protectrice de l'organisme aux stimuli nocifs, aux microbes et aux produits chimiques ou irritants. Elle provoque une modification de la perméabilité vasculaire, une altération du flux sanguin et une migration accrue des leucocytes dans la zone inflammatoire, et entraîne des douleurs, de la chaleur, des rougeurs, des gonflements et une insuffisance fonctionnelle des tissus touchés (Fatima et al., 2022).

De nombreux chercheurs ont démontré le potentiel anti-inflammatoire de la *Trigonella* dans des modèles expérimentaux. Dans un modèle *in vitro*, un extrait de méthanol de graines de fenugrec a inhibé la production de cytokines inflammatoires induites par le phorbol-12-myristat-13-acétate telles que le facteur de nécrose tumorale (TNF)- α dans les cellules cultivées THP-1. Dans une arthrite induite par des adjuvants chez les rats albinos, des chercheurs ont montré qu'un extrait d'éthanol de *Trigonella* réduisait de manière significative l'œdème du talon et diminuait les niveaux d'IL-1 α , IL-1 β , IL-2, IL-6 et TNF- α (Yadav et Baquer, 2014).

Les alcaloïdes, les saponines et les flavonoïdes sont principalement responsables de leurs propriétés anti-inflammatoires. Sindhu et *al.* (2012) ont évalué l'effet anti-inflammatoire du mucilage des graines de fenugrec sur les activités d'enzymes inflammatoires telles que la cyclooxygénase (COX), la lipo-oxygénase (LOX), la myéloperoxydase et les niveaux de nitrite et de protéine C-réactive chez les rats induits par l'arthrite. Le mucilage de fenugrec a réduit sensiblement l'activité des enzymes (COX-2) et de la myéloperoxydase et a diminué la concentration de la substance réactive de l'acide thiobarbituric (TBARS) (Singh et *al.*, 2022).

III.5. Activité antimicrobienne

Les infections microbiennes sont la principale cause du gaspillage alimentaire et de la dégradation de la qualité nutritionnelle, de la couleur, du goût et de la rancidité des aliments. Les épices comme le fenugrec présentent une bonne activité antimicrobienne et peuvent donc être utilisées en toute sécurité pour la conservation des aliments (Singh et *al.*, 2022), grâce à la présence de métabolites secondaires tels que les flavonoïdes, les saponines, les alcaloïdes, les stéroïdes et les tanins (Varshney et Siddique, 2023).

III.5.1. Activité antifongique

Dans une étude, des extraits aqueux de différentes parties de la plante de fenugrec (graines broyées et non broyées, tige, feuilles et racine) ont été préparés dans divers solvants tels que le méthanol, l'acétate d'éthyle et l'éther de pétrole pour déterminer leur activité contre diverses souches fongiques (Ruwali et *al.*, 2022), notamment les souches pathogènes de *Candida* (Varshney et Siddique, 2023). La coumarine, un constituant du *T. foenum-graecum*, a démontré une activité antifongique (Mahbub et *al.*, 2018). De plus, les feuilles de fenugrec contiennent des protéines appelées défensines qui ont inhibé la propagation mycélienne de *Rhizoctonia solani* et la germination des spores ainsi que la croissance hyphale consécutive de *Phaeoisariopsis* (Goyal et *al.*, 2016).

III.5.2. Activité antibactérienne

Les extraits méthanoliques et aqueux de graines de fenugrec ont également montré une activité antibactérienne contre les bactéries Gram-positives et Gram-négatives (Rahal et *al.*, 2023). La scopoletine, présente dans le fenugrec, a une activité bactériostatique contre *Escherichia coli*, *Staphylococcus aureus*, *Streptococcus sp.*, *Klebsiella pneumoniae* et *Pseudomonas aeruginosa* (Mahbub et *al.*, 2018). Les feuilles et les tiges de fenugrec semblent jouer un rôle important en tant qu'agents antibactériens, comparable à celui des

antibiotiques commerciaux à une concentration de 100 µl d'extrait de fenugrec (Sharma et al., 2016). La puissance antimicrobienne et l'efficacité varient en fonction des composants de la plante, des espèces de micro-organismes et du solvant d'extraction utilisés (Visuvanathan et al., 2022).

Les nanoparticules présentent une meilleure activité antimicrobienne par rapport à l'extrait brut, exemple FeNP nanoparticule de fer (Figure 26) (Radini et al., 2018). Il est maintenant temps d'explorer le mécanisme d'action derrière l'activité antimicrobienne de *Trigonella*. Une perméabilité accrue de la membrane cellulaire bactérienne médiée par nanoparticule d'argent (AgNP), une lyse cellulaire microbienne à plusieurs sites, et par conséquent, une libération d'un contenu protéique plus élevé dans le surnageant, suivie ultimement par l'inhibition de la croissance cellulaire et la mort cellulaire. Cependant, la pénétration d'AgNP dans la cellule bactérienne à Gram positif était en partie empêchée par la présence de peptidoglycane et d'autres composants dans la paroi cellulaire par rapport aux cellules bactériennes à Gram négatif. Les AgNP ont créé un environnement stressant pour les cellules bactériennes et ont entraîné la libération d'enzymes bactériennes, finalement inhibant la croissance cellulaire bactérienne (Singh et al., 2022).

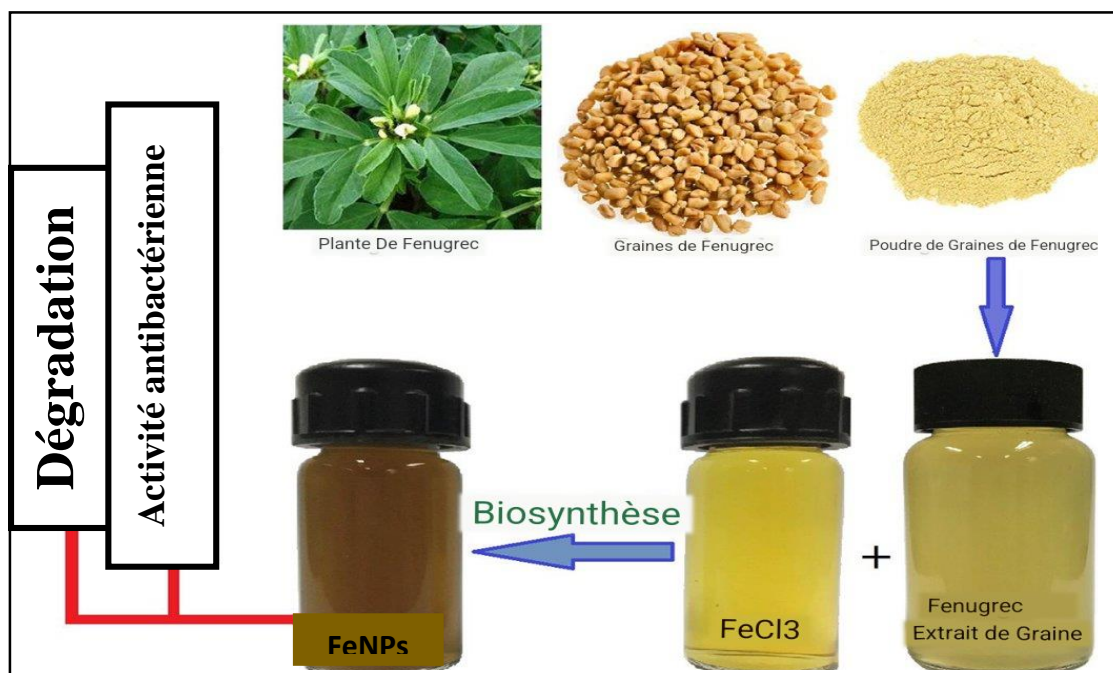


Figure 26: La biosynthèse de nanoparticules de fer en utilisant l'extrait de graines de *Trigonella* et ses applications antibactériennes (Radini et al., 2018).

III.5.3. Activité antivirale

Les propriétés antivirales de divers composés présents dans des sources naturelles telles que les graines de fenugrec ont été largement étudiées. La trigonelline, l'apigénine et l'orientine font partie des composés ayant des activités antivirales contre des virus tels que le virus de la fièvre aphteuse (FMDV) et le SARS-CoV-2. Le diosgénine a également montré des promesses dans la modulation de l'immunité acquise et l'augmentation de l'expression de l'interferon gamma (l'IFN-g), ce qui est significatif dans la lutte contre les infections virales telles que le VHC. La coumarine et la quercétine présentent des effets inhibiteurs contre la protéase du SARS-CoV-2 et les enzymes du VIH, respectivement. L'acide chlorogénique et la lutéoline démontrent également des activités antivirales contre des virus tels que l'entérovirus 71 (EV71), le virus de l'hépatite B (VHB) et le VIH par différents mécanismes. Le glycoside de kaempférol perturbe différents stades du cycle de vie viral, ce qui en fait un autre candidat prometteur pour la thérapie antivirale (Ahmed et *al.*, 2023).

III.6. Activité antioxydante

La régulation de la pro-oxydation et de l'antioxydation est étroitement contrôlée dans les cellules normales, mais un déséquilibre conduit au stress oxydatif, impliqué dans plus de 50 maladies (Nagulapalli Venkata et *al.*, 2017). Les parties aériennes, l'huile de graines, ainsi que les extraits de la cosse, de la graine et de l'endosperme du fenugrec, ont montré respectivement des activités antioxydantes de 72 %, 64 % et 56 % (Yaldiz et camlica, 2021) en raison de la présence de polyphénols, de flavonoïdes et d'autres composants hydrosolubles (Nagulapalli Venkata et *al.*, 2017). Les saponines stéroïdiennes ont également montré des activités antioxydantes (Peter, 2012). Cinq flavonoïdes différents ont été identifiés dans les graines de fenugrec, à savoir la vitexine, le tricine, la naringénine, la quercétine, et le tricine-7-O-beta-D-glucopyranoside qui possède des propriétés antiradicales et antioxydantes significatives (Yaldiz et camlica, 2021).

Les graines de fenugrec alimentaire ont été démontrées pour contrecarrer l'augmentation de la peroxydation lipidique et les altérations de l'activité des enzymes antioxydantes cellulaires, y compris la superoxyde dismutase (SOD), la glutathion réductase (GR), la catalase et la glutathion peroxydase (GPx) dans les tissus (Yadav et Baquer, 2014). De plus, l'extrait de graines de fenugrec riche en polyphénols a été rapporté pour réduire de manière significative les modifications oxydatives induites par le H₂O₂ dans les érythrocytes humains, qu'ils soient normaux ou diabétiques (Srinivasan, 2006).

Le contenu en flavonoïdes du fenugrec réduit l'accumulation des espèces réactives de l'oxygène (ROS) intracellulaires et démontre également un effet protecteur sur l'ADN mitochondrial contre les dommages oxydatifs, améliorant ainsi la fonction mitochondriale (Ruwali et al., 2022). Son action antioxydante est rendue possible en donnant un atome d'hydrogène aux radicaux libres pour les stabiliser. De plus, cela implique la cascade des caspases pour lutter contre le stress oxydatif et les altérations associées (Figure 27). Sharma et al. (2020) ont observé que la plante favorise l'expression des enzymes antioxydantes, tandis que Ktari et al. (2017) ont suggéré que le groupe carboxyle pourrait être l'agent responsable de son activité antioxydante (Singh et al., 2022).

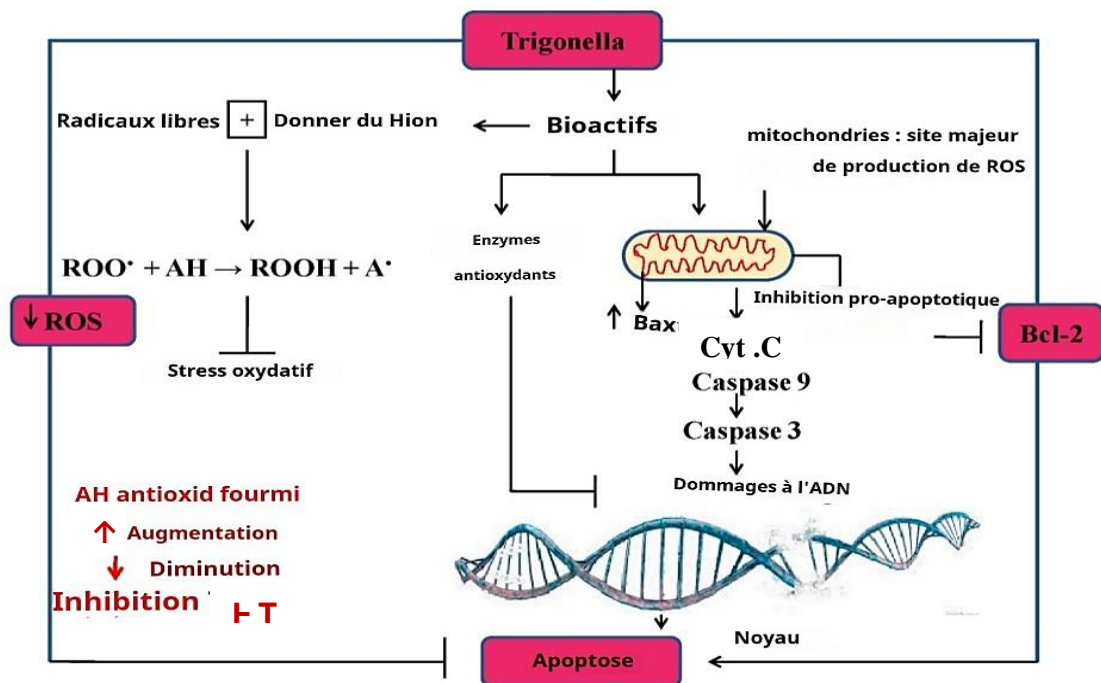


Figure 27: Un aperçu des utilisations médicales potentielles du *Trigonella* (Singh et al., 2022).

III.7. Activité cardioprotectrice

Une étude animale a révélé que l'administration de fenugrec s'est avérée efficace pour réduire l'étendue des dommages myocardiques et contrecarrer significativement le stress oxydatif lors d'un infarctus du myocarde induit par l'isoprénaline chez les rats (Al-Asadi, 2014). Le fenugrec régule fortement les niveaux de lipides sanguins, donc il est efficace contre l'athérosclérose (Varshney et Siddique, 2023). Une autre propriété du fenugrec est la réduction de l'agrégation plaquettaire grâce à ses coumarines et autres constituants, ce qui diminue considérablement le risque de formation anormale de caillots sanguins associée aux crises cardiaques et aux accidents vasculaires cérébraux (Al-Asadi, 2014).

Parce que le fenugrec contient des flavonoïdes, des études épidémiologiques ont montré une réduction de la mortalité à long terme due aux maladies coronariennes chez les personnes suivant un régime riche en flavonoïdes, notamment la quercétine. Ainsi, des chercheurs ont évalué le régime alimentaire de 805 Danois âgés de 65 à 84 ans et les ont suivis pendant cinq ans. Ils ont constaté que les hommes consommant les quantités les plus élevées de flavonoïdes avaient un risque de crise cardiaque pendant l'étude juste en dessous de 50 %. Ceux ayant la plus faible consommation étaient presque quatre fois plus susceptibles de subir un AVC que les grands consommateurs (Rahal et *al.*, 2023).

Le fenugrec, un bon antioxydant, protège les tissus myocardiques du stress oxydatif (Varshney et Siddique, 2023).

. III.8. Activité gastroprotectrice

L'extrait aqueux et la fraction de gel dérivée des graines ont montré des effets protecteurs significatifs contre les ulcères par rapport à ceux de l'oméprazole (Al-Asadi, 2014), un bloqueur de la pompe à protons utilisé dans le traitement des problèmes gastro-intestinaux tels que le reflux gastro-œsophagien, les ulcères gastriques et duodénaux, et la gastrite (Yadav et Baquer, 2014). L'effet cytoprotecteur des graines est dû à l'action antisécrétoire et aux effets sur les glycoprotéines muqueuses. L'augmentation de la peroxydation lipidique induite par l'éthanol est également prévenue par les graines de fenugrec, améliorant ainsi le potentiel antioxydant de la muqueuse gastrique et réduisant les lésions (Aher et *al.*, 2016). Les extraits de graines de fenugrec, enrichis en stéroïdes, augmentent l'efficacité des enzymes digestives (Oueslati et Ghédira, 2015).

L'activité anti-ulcéreuse est souvent attribuée à la présence de flavonoïdes qui protègent la membrane muqueuse contre les lésions ulcéreuses causées par divers agents irritants ou corrosifs (Ruwali et *al.*, 2022). La fraction polysaccharidique des graines de fenugrec forme une couche de gel muciniforme de galactomannane à la surface de la muqueuse ou des complexes protecteurs entre le gel et le mucus comme barrière contre les agents introduits dans l'estomac ou contre l'acide et la pepsine formés endogènement dans l'estomac. L'augmentation de la teneur en sulfhydryle de la muqueuse gastrique peut contribuer à l'activité anti-ulcéreuse des graines de fenugrec, car les composés sulfhydryle agissent comme des antioxydants et sont importants pour maintenir l'intégrité muqueuse (Al-Asadi, 2014).

Selon l'étude menée par Figer et *al.*, (2017) l'analyse in silico a révélé que le principal objectif des graines de fenugrec est d'antagoniser la pompe H⁺K⁺ATPase, produisant ainsi un effet gastroprotecteur (Figure 28). Dans une autre étude, les patients souffrant de brûlures d'estomac récurrentes ont reçu un produit à base de fibres de fenugrec avant les repas pendant 2 semaines. Les résultats ont montré une baisse significative de la gravité des brûlures d'estomac, indiquant les bienfaits gastroprotecteurs du fenugrec (Ruwali et *al.*, 2022).

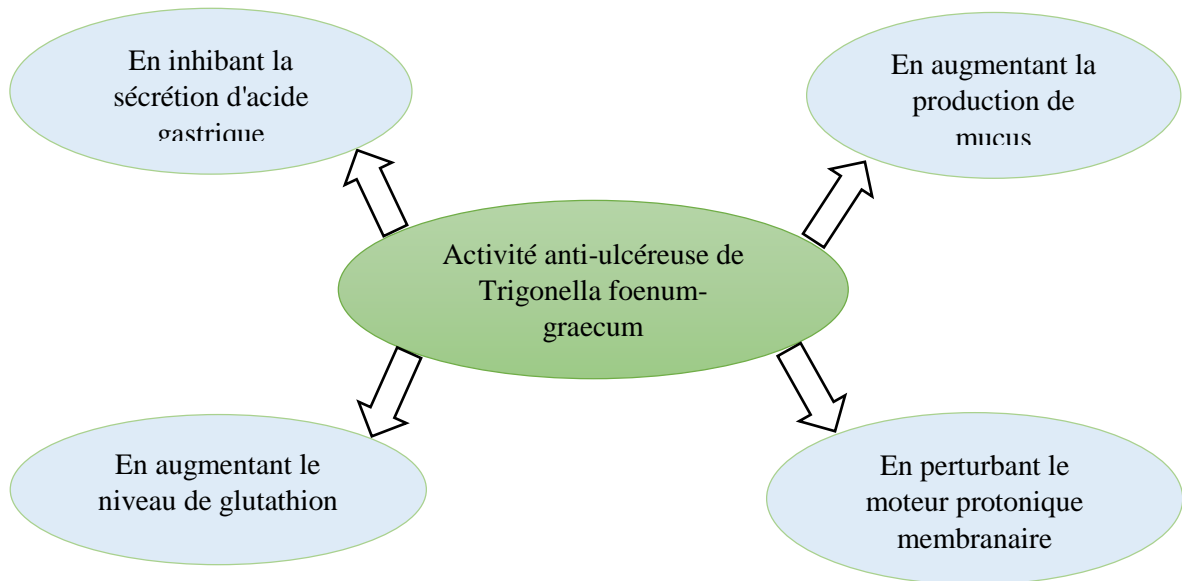


Figure 28: Activité gastroprotectrice des graines de fenugrec (Pal et Mukherjee, 2020).

III.9. Activité hépatoprotectrice

L'hépatotoxicité et les lésions hépatiques chroniques, dues à diverses causes, sont les principaux troubles métaboliques affectant les individus de tous âges. L'alcoolisme chronique et de nombreux médicaments allopathiques sont parmi les raisons associées aux maladies du foie et à la fibrose (Yadav et Baquer, 2014). Les altérations hépatiques peuvent être favorablement traitées ou contrôlées par la supplémentation en antioxydants. Des composants comme le diosgénine, les saponines, les flavonoïdes et les polyphénols possèdent des propriétés antioxydantes, hypolipidémiques et hypocholestérolémiantes. Dans une étude, le fenugrec a amélioré le profil lipidique et la teneur en collagène chez les rats Wistar hépatotoxiques à une dose de 200 mg/kg par jour (Varshney et Siddique, 2023).

Un extrait polysaccharidique des graines de fenugrec a significativement diminué et guéri de manière dose-dépendante l'hépatotoxicité et la génotoxicité induites par le thiaméthoxame (insecticide) dans le foie (Amalraj et *al.*, 2022). Dans une autre étude, le fenugrec a réduit l'agrégation lipidique dans le foie en augmentant l'excrétion des lipides

dans les selles. Les lésions métaboliques et hépatiques survenues après une ischémie-reperfusion pourraient être prévenues par le fenugrec, qui s'est avéré efficace dans la réduction des dommages causés par ce processus. Il a été démontré que les polyphénols et les flavonoïdes sont utiles dans le traitement de l'ischémie hépatique. L'utilisation de l'extrait de fenugrec sur des rats a montré que les taux de l'aspartate aminotransférase (AST), de l'alanine aminotransférase (ALT) et de la lactate déshydrogénase (LDH) dans le sérum sanguin étaient significativement réduits, démontrant ainsi les effets hépatoprotecteurs (Varshney et Siddique, 2023).

III.10. Activité Neuroprotectrice

La douleur neuropathique est l'un des troubles neurologiques les plus courants, dont la pathogenèse est principalement attribuée aux cytokines inflammatoires et aux cellules microgliales (Ruwali et *al.*, 2022). La maladie de Parkinson (PD) et la maladie d'Alzheimer (AD) sont des troubles neurodégénératifs caractérisés par un déficit d'apprentissage, une diminution des fonctions cognitives et une perte de neurones dopaminergiques dans la substance noire (Arya et *al.*, 2023). Des études menées par Zameer et ses collaborateurs (2018) indiquent l'efficacité des composés de fenugrec contre plusieurs troubles neurologiques tels que la maladie d'Alzheimer, Parkinson et la dépression (Figure 29) (Ruwali et *al.*, 2022).

Il a été rapporté que les graines de fenugrec ont un effet neuroprotecteur, attribué à la présence de flavonoïdes polyphénoliques tels que la naringénine, le kaempférol, la vitexine et la saponine stéroïdienne dans les graines de fenugrec. Il a été suggéré que la saponine, présente dans le fenugrec, pourrait inhiber la maladie d'Alzheimer en augmentant l'activité d'inhibition de l'acétylcholinestérase (AChE). Elle pourrait augmenter les antioxydants et améliorer l'apoptose en régulant les gènes liés à l'apoptose (Bax, Bcl-2 et caspase-3) dans la voie apoptotique, non pas par la génération d'espèces réactives de l'oxygène (ROS) dans les cellules cérébrales des rats induits par la maladie d'Alzheimer (Naeem et *al.*, 2021). La diosgénine a montré divers progrès pharmacologiques dans le traitement de multiples maladies du système nerveux central telles que les lésions cérébrales, les accidents vasculaires cérébraux, la neuroinflammation, la douleur neuropathique, les troubles dépressifs, le glioblastome et les troubles cognitifs, ainsi que le mécanisme d'action sous-jacent aux niveaux cellulaire et moléculaire (Arya et *al.*, 2023).

Bin-Hafeez et ses collègues (2003) ont utilisé un modèle de souris pour étudier les effets neuroprotecteurs de 5% de poudre de graines de fenugrec sur la neurotoxicité induite

par le chlorure d'aluminium et ont constaté que la poudre de graines de fenugrec avait un impact neuroprotecteur substantiel. *Trigonella* (100 mg/kg) a également été démontrée jouer un rôle dans la réduction du risque de maladie de Parkinson en évitant les comportements rotationnels et en restaurant les niveaux de neurones de la substance noire compacte (SNC) et de MDA (malondialdéhyde) (Visuvanathan *et al.*, 2022). L'effet protecteur de la diosgénine contre la maladie de Parkinson induite par LPS a été observé, ce qui peut atténuer le LPS en supprimant la voie de signalisation TLR4/NF-KB (Arya *et al.*, 2023).

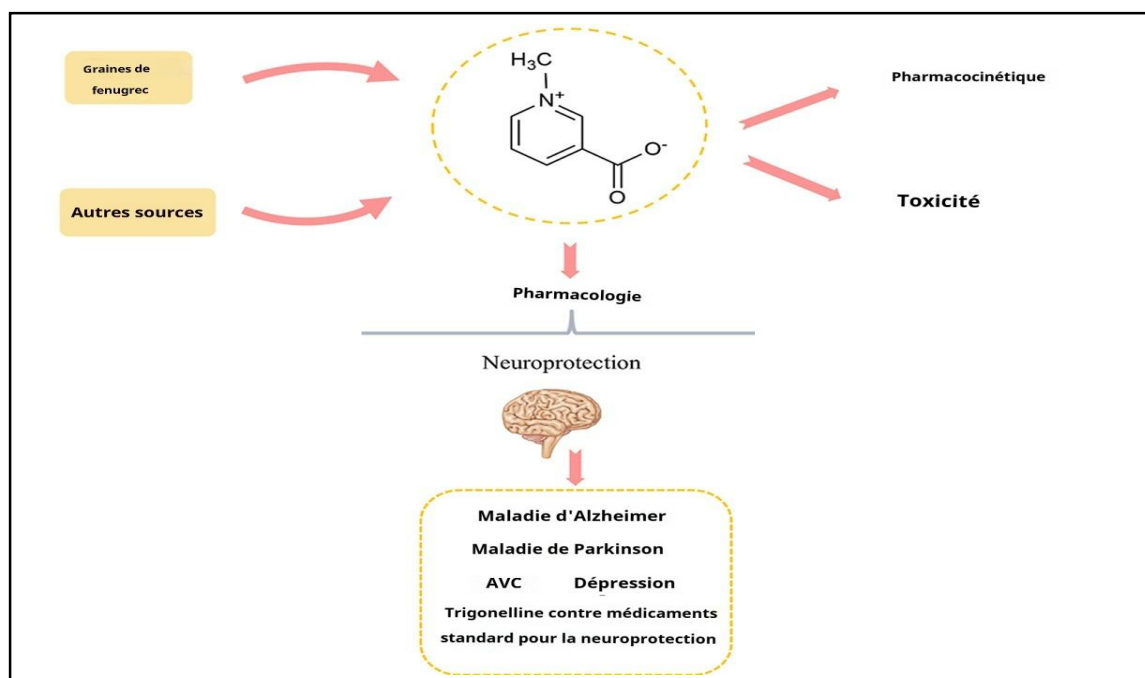


Figure 29: Les effets neuroprotecteurs de la trigonelline (Liang *et al.*, 2023).

III.11. Activité anti-cataracte

La cataracte, opacification du cristallin de l'œil, demeure la principale cause d'anomalie visuelle, contribuant à 50 % de la cécité mondiale (OMS 2005) (Nathiya *et al.*, 2014). Le potentiel anti-cataracte du *Trigonella foenum-graecum* a été évalué dans un milieu *in vitro* induit par le sélénite. Ce milieu a été enrichi en sélénite et en extrait aqueux de *T. foenum-graecum* pour le groupe test. Une augmentation du taux de malondialdéhyde et une diminution du taux de GSH ont été observées dans le groupe témoin par rapport aux lentilles standard. Le glutathion est restauré de manière surprenante et les niveaux de malondialdéhyde sont réduits par *T. foenum-graecum*. Il joue également un rôle significatif dans le rétablissement des enzymes antioxydantes, telles que la superoxyde dismutase, la glutathion peroxydase, la catalase et la glutathion S-transférase. Le fenugrec protège contre

la cataracte expérimentale en raison de ses propriétés antioxydantes et restaure également de manière significative le niveau de GSH de manière dose-dépendante (Naeem et *al.*, 2021).

III.12. Autres activités

III.12.1. Stimulation de la capillogénase

De nombreuses études soutiennent l'efficacité des graines de fenugrec pour favoriser la croissance des cheveux. Une expérience menée sur des lapins a testé différents traitements, dont des extraits de graines de fenugrec à différentes concentrations et un boost capillaire contenant du minoxidil. Après trois semaines, le traitement à 10 % d'extrait de fenugrec a montré une augmentation significative de la longueur des poils de 22,72 mm par rapport aux autres groupes de contrôle (Ruwali et *al.*, 2022).

III.12.2. Stimulation lactogénique

De manière concluante, le fenugrec est une plante médicinale précieuse pour la santé des femmes. Plusieurs études cliniques confirment ses effets bénéfiques sur l'allaitement, la dysménorrhée, le syndrome des ovaires polykystiques et la ménopause (Figure 30).

Des études humaines confirment les effets positifs du fenugrec sur l'allaitement. Une dose de 7,5 g de fenugrec, pendant au moins une semaine, peut montrer une amélioration significative de la production de lait. De plus, le goût du lait semble rester inchangé, car la consommation de lait par les nourrissons a augmenté en même temps que sa production (Akhtari et *al.*, 2024). L'idée sous-jacente à la stimulation de la production de lait maternel par le fenugrec est qu'il induit la production de sueur, les glandes mammaires étant des glandes sudoripares modifiées, ce qui affecte positivement la sécrétion de lait maternel (Ruwali et *al.*, 2022).

Il est suggéré que les propriétés stimulantes de l'utérus et de la lactation du fenugrec pourraient être dues à la présence de stéroïdes tels que les saponines dans la graine, qui pourraient être similaires à l'activité de l'ocytocine sur l'utérus. Comme la dopamine inhibe la sécrétion de prolactine, les graines de fenugrec sont censées agir comme des antagonistes de la dopamine (Naeem et *al.*, 2021).

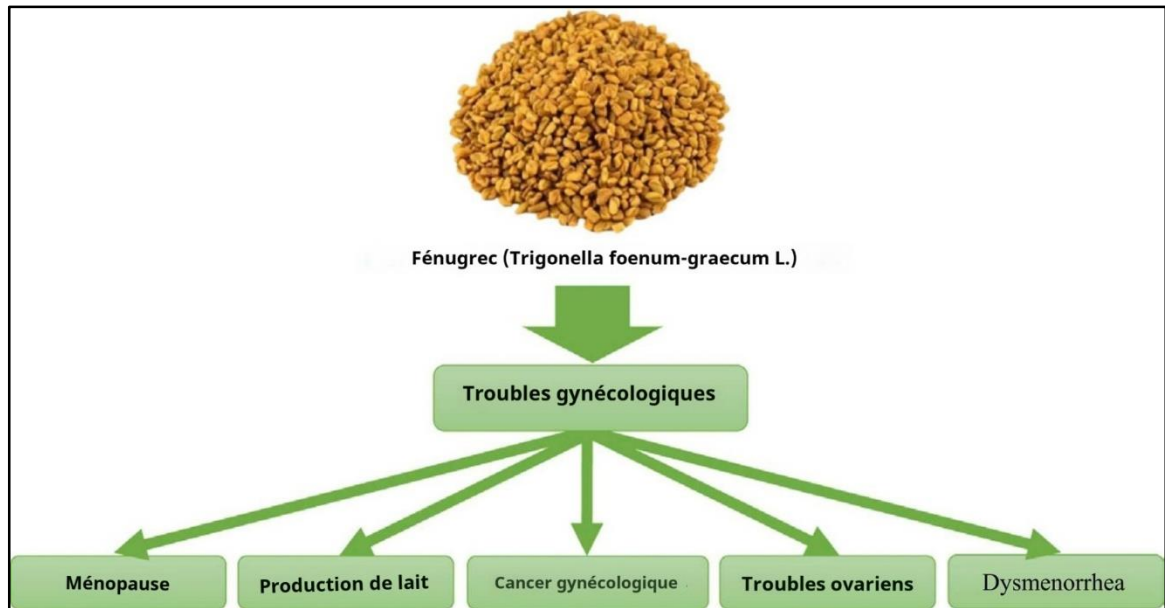


Figure 30: l'impact du fénu grec (*Trigonella foenum-graecum* L.) sur la santé des femmes (Akhtari et al., 2024).

Conclusion



Conclusion

Conclusion

Depuis longtemps, les plantes ont été la principale source de médicaments et toutes les sociétés humaines les ont pratiquement utilisées non seulement comme sources de nutrition mais aussi comme thérapie contre les maladies et les affections.

Le fenugrec est l'une des plantes médicinales les plus couramment employées en phytothérapie traditionnelle.

Les propriétés médicinales attribuées au fenugrec ont été associées à ses composants, tels que les glucides complexes (galactomannanes), les sapogénines stéroïdiennes (diosgénine), les alcaloïdes (trigonelline) et les acides aminés (4-hydroxyisoleucine).

Les utilisations traditionnelles du fenugrec comprennent le traitement de l'anorexie, des troubles nerveux, de la fièvre, de la gastrite, des ulcères gastriques et pour favoriser l'allaitement. Ses propriétés pharmacologiques comprennent l'antidiabétique, l'antioxydant, l'hypocholestérolémique, l'antineoplasique, l'anti-inflammatoire, l'antiulcérogénique, l'antipyrétique et l'antitumoral.

La recherche sur le fenugrec montre ses bienfaits pour la santé et ses propriétés médicinales potentielles dans diverses indications et présente peu ou pas d'effets secondaires, suggérant son potentiel pharmaceutique, thérapeutique et nutritionnel. De plus, le fenugrec peut entraîner des effets indésirables et il est également signalé qu'il interagit avec certains médicaments.

Références

bibliographiques

Références bibliographiques

A

- Aasim M., Baloch F.S., Nadeem M.A., Bakhsh A., Sameeullah M. & Day S. (2018).** Fenugreek (*Trigonella foenum-graecum L.*): An Underutilized Edible Plant of Modern World. *Springer Nature*.
- Abas A. S. M. & Naguib D. M. (2019).** Effect of germination on anticancer activity of *Trigonella foenum* seeds extract. *Biocatalysis and Agricultural Biotechnology* 18.
- Aher R. R., Belge S. A., Kadam S. R., Kharade S. S., Misal A. V. & Yeole P. T. (2016).** Therapeutic importance of fenugreek (*Trigonella foenum-graecum L.*). A review. *Journal of Plant Science & Research* 3, 1-4.
- Ahmad N., Riaz S., Ali A. & Riaz T. (2023).** Fenugreek (*Trigonella foenum graecum*): An Overview of Food Uses and Health Benefits. In **Ismail T., Akhtar S. & Lazarte C.E.** (eds), *Neglected Plant Foods Of South Asia* (453-471). *Springer*, Cham.
- Ahmed S. I., Jamil S., Ismatullah H., Hussain R., Bibi S., Khandaker M. U., Naveed A., Idris A. M. & Emran T. B. (2023).** A comprehensive perspective of traditional Arabic or Islamic medicinal plants as an adjuvant therapy against COVID-19. *Saudi Journal of Biological Sciences* 30, 1-16.
- Akhtari E., Ram M., Zaidi S. M. A., Marques A. M., Rahimi R. & Bahramsoltani R. (2024).** Fenugreek (*Trigonella foenum-graecum L.*) in Women's Health: A Review of Clinical Evidence and Traditional Use. *Journal of Herbal Medicine* 43, 1-7.
- Al-Asadi J. (2014).** Therapeutic Uses of Fenugreek (*Trigonella foenum-graecum L.*). *AMERICAN JOURNAL OF SOCIAL ISSUES AND HUMANITIES*. Special issue, 21-36.
- Alemu A. W. & Doepel L. (2011).** Fenugreek (*Trigonella foenum-graecum L.*) as an alternative forage for dairy cows. *Animal: An International Journal of Animal Bioscience* 5, 1370–1381.
- Alizadeh S., Jahanmehr S. A. H., Ardjmand A. R., Rezaian M., Dargahi H., Einolahi N. & Sadrossadat M. (2009).** Antineoplastic effect of Fenugreek (*Trigonella Foenum Graecum*) seed extract against acute myeloblastic leukemia cell line (KG-1). *Iranian Journal of Blood and Cancer* 1, 139-146.
- Almalki D.A. & Naguib D.M.** Anticancer Activity of Aqueous Fenugreek Seed Extract Against Pancreatic Cancer. Histological Evidence. *J. Gastrointest. Cancer* 2021, 1–4.
- Amalraj A., Kuttappan S., AC, K. V. & Matharu A. (2022).** Herbs, Spices and Their Roles in Nutraceuticals and Functional Foods. *Elsevier*.
- Amin A., Alkaabi A., Al-Falasi S. & Daoud SA. (2005).** Chemopreventive activities of *Trigonella foenum-graecum* (Fenugreek) against breast cancer. *Cell Biol Int* 29, 687–94.
- Arya P., Munshi M. & Kumar P. (2023).** Diosgenin: Chemistry, extraction, quantification and health benefits. *Food Chemistry Advances* 2, 1-15.

B

Basu A., Basu S. K., Kumar A., Sharma M., Chalghoumi R., Hedi A. & Cetzal-Ix W. (2014). Fenugreek (*Trigonella foenum-graecum L.*), a potential new crop for Latin America. *American Journal of Social Issues and Humanities* **4**, 148-162.

Basu S. K., Zandi P. & Cetzal-Ix W. (2019). Chapter 28 -Fenugreek (*Trigonella foenum-graecum L.*): Distribution, Genetic Diversity, and Potential to Serve as an Industrial Crop for the Global Pharmaceutical, Nutraceutical, and Functional Food Industries. In Singh R. B., Watson R. R. & Takahashi T. (eds), *The Role of Functional Food Security in Global Health* (471-497). *Academic Press*.

Basu T. K. & Srichamroen A. (2010). Chapter 28 - Health Benefits of Fenugreek (*Trigonella foenum-graecum leguminosae*). In Watson R. R. & Preedy V. R. (eds). *Bioactive Foods in Promoting Health* (425-435). *Academic Press*.

Bin-Hafeez B., Haque R., Parvez S. Pandey S., Sayeed I. & Raisuddin S. (2003). Immunomodulatory effects of fenugreek (*Trigonella foenum graecum L.*) extract in mice. *Int. Immunopharmacol* **3**, 257–265.

C

Chen C., Jiulong M., Chun S. M., Huayu Z., Ming Z., Xia C. & Yan S. (2021). Trigonelline induces autophagy to protect mesangial cells in response to high glucose via activating the miR-5189-5p-AMPK pathway. *Phytomedicine* **92**, 1-10.

D

Das S. & Bhadrapura L. D. (2017). *Trigonella foenum-graecum* (Fenugreek) for Management of Diabetes. (vol. 45). *RPMP* (375-400). Researchgate.

E

El Bairi K., Ouzir M., Agnieszka N. & Khalki L. (2017). Anticancer potential of *Trigonella foenum graecum*: Cellular and molecular targets. *Biomedicine & Pharmacotherapy* **90**, 479–491.

F

Faeste C. K., Namork E. & Lindvik H. (2009). Allergenicity and antigenicity of fenugreek (*Trigonella foenum-graecum*) proteins in foods. *The Journal of Allergy and Clinical Immunology* **123**, 187–194.

Fatima H., Shahid M., Pruitt C., Pung M. A., Mills P. J., Riaz M. & Ashraf R. (2022). Chemical fingerprinting, antioxidant, and anti-inflammatory potential of hydroethanolic extract of *Trigonella foenum-graecum*. *Antioxidants* **11**, 1-24.

Figier B., Pissurlenkar R., Ambre P., Kalekar S., Munshi R., Gatne M. & Shirsat V. (2017). Treatment of Gastric Ulcers with Fenugreek Seed Extract; In vitro. In vivo and In silico Approaches. *Indian Journal of Pharmaceutical Sciences* **79**, 724–730.

G

Gayyur F., Talib M., & Lubaba Z. (2021). A Review on: Pharmacological action of Fenugreek Research & Reviews. *Journal of Pharmacognosy and Phytochemistry* **9**, 51-57.

Ghedira K., Goetz P. L. J. R. & Le Jeune R. (2010). Fenugrec: *Trigonella foenum-graecum L.* (Fabaceae ex. Leguminosae). *Phytothérapie* **8**, 180-184.

Ghevariya H. H., Vatukiya V. N., Mistry N. H. & Jain N. K. (2023). Comparative evaluation of bioactive compounds and antioxidant properties of fenugreek (*Trigonella foenum-graecum L.*) seed, stem, leaf, and micro greens. *An international journal of ideas* **37**, 62-75.

Ghosh B., Chandra I. & Chatterjee S. (2015). Fenugreek (*Trigonella foenum-graecum L.*) and its necessity. *Fire Journal of Engineering & Technology* **1**, 60-67.

Goyal S., Gupta N. Chatterjee S. (2016). Investigating therapeutic potential of *Trigonella foenum-graecum L.* as our defense mechanism against several human diseases. *Journal of Toxicology* **2016**, 1-10.

Goyal V., Singh A., Singh J., Kaur H., Kumar S. & Rawat M. (2022). Biogenically structural and morphological engineering of *Trigonella foenum-graecum* mediated SnO₂ nanoparticles with enhanced photocatalytic and antimicrobial activities. *Materials Chemistry and Physics* **282**, 1-10.

H

Habtemariam S. (2019). Chapter 17 - The chemical and pharmacological basis of fenugreek (*Trigonella foenum-graecum L.*) as potential therapy for type 2 diabetes and associated diseases. In Habtemariam S. (eds). *Medicinal Foods as Potential Therapies for Type-2 Diabetes and Associated Diseases (579-637)*. Academic Press.

Hanif M. A., Nawaz H., Khan M.M. & Byrne H. (2019). Medicinal Plants of South Asia. Novel Sources for Drug Discovery. *Elsevier*.

J

Jain S. C., Agrawal M. & Sharma R. A. (1996). The genus *Trigonella*—phytochemistry and biology. *Ancient science of life* **16**, 108-117.

Joshi R. C., Mansi S. K., Malhotra M. & Anwer M. (2009). Antioxidant activity, phenol and flavonoid contents in fenugreek varieties under semi-arid conditions. Proceedings of International Conference on Horticulture for Livelihood Security and Economic Growth, *PNASF*, Bangalore, 9–12.

K

Kara E. & Surmen M. (2023). Fenugreek (*Trigonella foenum-graecum L.*). In *Alternative forage crops (137-151)*. Publishing house.

Kor N. M., Didarshetaban M.B. & Saeid Pour H.R. (2013). Fenugreek (*Trigonella foenum-graecum L.*) As a Valuable Medicinal Plant. *International Journal of Advanced Biological and Biomedical Research* **1**, 922-931.

Ktari N., Trabelsi I., Bardaa S., Triki M., Bkhairia I., Salem R. B. S. B. & Salah R. B. (2017). Antioxidant and hemolytic activities, and effects in rat cutaneous wound healing of a novel polysaccharide from fenugreek (*Trigonella foenum graecum*) seeds. *International Journal of Biological Macromolecules* **95**, 625–634.

Kumar S., Verma M., Hajam Y. A. & Kumar R. (2024). Honey infused with herbs: A boon to cure pathological diseases. *Heliyon* **10**, 1-25.

L

Lal G., Saran P. L., Devi G., Bijarniya D. & Raj R. (2014). Production technology of fenugreek (*Trigonella foenum-graecum L.*) (244-252). *Researchgate*.

Liang Y., Dai X., Cao Y., Wang X., Lu J., Xie L., Liu k. & Li X. (2023). The neuroprotective and antidiabetic effects of trigonelline: A review of signaling pathways and molecular mechanisms. *Biochimie* **206**, 93–104.

Liu Y., Lei F., He L., Xu W. & Jiang J. (2020). Comparative study on the monosaccharides of three typical galactomannans hydrolyzed by different methods. *Industrial Crops and Products* **157**, 1-8.

M

Mahbub J., Mou R. A., Sikta S. A., Rahman A. & Dash P. (2018). Biological and Medicinal Significance of *Trigonella Foenum-Graecum*: A REVIEW. *International Journal of Life Sciences and Review* **4**, 15-26.

Malhotra S.K. (2011). Fenugreek (*Trigonella foenum-graecum L.*) (801-846). *Researchgate*.

Mehrafarin A. (2013). Effect of Methanol and Nano-Iron Chelate Fertilizer Application on Agronomical and Medicinal Yield of Fenugreek (*Trigonella foenum-graecum L.*). Thèse de doctorat, Islamic Azad University, Tehran-Iran, 88p.

Mohammad F., Wajid M. A. & Bhat M. A. (2019). Effect of salicylic acid sprays on the performance of fenugreek grown with graded levels of salinity. *The Saudi Journal of Life Sciences* **26**, 346-354.

N

Nadeem M.A., Baloch F.S., Habyarimana E., sönmez o., Aasim M., Zencirci N. & Fiaz S. (2023). Legumes Biofortification (1^e éd). *Springer Nature*.

Naeem M., Aftab T. & Khan M. M. A. (2021). Fenugreek: Biology and Applications (1^e éd). *Springer Nature*.

Nagulapalli Venkata K. C., Swaroop A., Bagchi D. & Bishayee A. (2017). A small plant with big benefits: Fenugreek (*Trigonella foenum-graecum Linn.*) for disease prevention and health promotion. *Molecular nutrition & food research* **61**, 1-26.

Nathiya S., Durga M. & Devasena T. (2014). Therapeutic role of *Trigonella foenum-Graecum* [fenugreek] – A review. *International Journal of Pharmaceutical Sciences Review and Research* **27**, 74-80.

O

Oueslati H. A. & Ghédira K. (2015). Notes ethnobotanique et phytopharmacologique sur *Trigonella foenum-graecum*. *Phytothérapie* **13**, 234-238.

P

Pal D. & Mukherjee S. (2020). Chapter 13- Fenugreek (*Trigonella foenum*) Seeds in Health and Nutrition. In Victor R. P. & Ronald R. W. (eds), *Nuts and Seeds in Health and Disease Prevention* (161-170). Academic Press.

Parthasarathy V. A., Chempakam B. & Zachariah T. J. (2008). *Chemistry of Spices*. Cabi international.

Peter K.V. (2012). *Handbook of Herbs and Spices* (2^e éd., vol. 1). Woodhead Publishing Limited. Elsevier.

Petropoulos G. A. (2002). Fenugreek: the genus *Trigonella* (vol. 11). *Medicinal and Aromatic Plants*. CRC Press.

R

Radini I. A., Hasan N., Malik M. A. & Khan Z. (2018). Biosynthesis of iron nanoparticles using *Trigonella foenum-graecum* seed extract for photocatalytic methyl orange dye degradation and antibacterial applications. *Journal of Photochemistry and Photobiology B: Biology* **183**, 154–163.

Rahal El K., Meryama M. & Rachid Z. (2023). Fenugreek (*Trigonella Foenum-Graecum L.*): Health, Medicine and Chemistry. *Austin Pharmacol Pharm* **7**, 1-4.

Rahmani M. (2017). Etude physiologique et valorisation des plantes fourragères et médicinales dans la wilaya de Sidi Bel-Abbés, Algérie occidentale : Cas de Fenugrec (*Trigonella foenum-graecum L.*).Thèse de doctorat, Université Djillali Liabes de Sidi Bel-Abbés, Algérie, 97p.

Rosengarten F. (1969). *The book of spices*. Wynnewood, PA: Livingston.

Rouag F. (2021). Effets biochimiques, hormonaux et neurocomportementaux du Fenugrec (*Trigonella foenum graecum L.*) chez les rats wistar. Thèse de doctorat, Université Badjimokhtar Annaba, Algérie, 168p.

Ruwali P., Pandey N., Jindal K. & Singh R. V. (2022). Fenugreek (*Trigonella foenum-graecum*): Nutraceutical values, phytochemical, ethnomedicinal and pharmacological overview. *South African Journal of Botany* **151**, 423-431.

S

Sarwar S., Hanif M. A., Ayub M. A., Boakye Y. D. & Agyare, C. (2020). Chapter 20 - Fenugreek. In Hanif M. A., Nawaz H., Khan M. M. & Byrne H. J. (eds). *Medicinal Plants of South Asia* (257–271). Elsevier.

Savita V., Rajendra P. A., Pooja S. & Piyush T. (2008). Analgesic and anti-inflammatory activities of *Trigonella foenum-graecum* (seed) extract. *Acta Poloniae Pharmaceutica* **65**, 473-476.

Sebastian K.S. & Thampan R.V. (2007). Differential effects of soybean and fenugreek extracts on the growth of MCF-7 cells. *Chem Biol Interact* **170**, 135-43.

Shams F., Azeem A., Shams A., Tawab A., Rehman S., Tariq S., Latief N. & Ijaz B. (2022). Flavonoid rich extract of *Trigonella foenum-graecum* leaves ameliorate liver fibrosis. *Food Bioscience* **50**, 1-12.

Sharma S., Mishra V. & Srivastava N. (2020). Protective effect of *Trigonella foenum-graecum* and *Cinnamomum zeylanicum* against diabetes induced oxidative DNA damage in rats. *Indian Journal of Biochemistry & Biophysics* **57**, 15-26.

Sharma V., Singh P. & Rani A. (2016). Antimicrobial activity of *Trigonella foenum-graecum* L. (Fenugreek). *European Journal of Experimental Biology* **7**, 1-4.

Shashikumar J. N., Champawat P. S., Mudgal V. D. & Jain S. K. (2019). Role of fenugreek (*Trigonella foenum graecum*) on in management of diabetes disease. *J Pharmacogn Phytochem* **8**, 184-187.

Shaukat T. M., Omer M. O., Javeed A., Rehman H. U. & Shaukat T. M. (2023). Isolation of alkaloidal and glycosidal fractions from leaves of *Trigonella foenum-graecum* L. cv. Desi indigenous to Pakistan for antiprostaglandin evaluation as substitute of nonsteroidal anti-inflammatory drugs. *Journal of Ethnopharmacology* **317**, 1-9.

Shawky E., Sobhy A. A., Ghareeb D. A., Shams Eldin S. M. & Selim D. A. (2022). Comparative metabolomics analysis of bioactive constituents of the leaves of different *Trigonella* species: Correlation study to α -amylase and α -glycosidase inhibitory effects. *Industrial Crops and Products* **182**, 1-14.

Sindhu G., Ratheesh M., Shyni G. L., Nambisan B. & Helen A. (2012). Anti-inflammatory and antioxidative effects of mucilage of *Trigonella foenum-graecum* (Fenugreek) on adjuvant induced arthritic rats. *International Immunopharmacology* **12**, 205-211.

Singh N., Yadav S. S., Kumar S. & Narashiman B. (2022). Ethnopharmacological, phytochemical and clinical studies on Fenugreek (*Trigonella foenum-graecum* L.). *Food Bioscience* **46**, 1-31.

Srinivasan K. (2006). Fenugreek (*Trigonella foenum-graecum*): A Review of Health Beneficial Physiological Effects. *Food Reviews International* **22**, 203-224.

Sun W., Shahrajabian M. H. & Cheng Q. (2021). Fenugreek cultivation with emphasis on historical aspects and its uses in traditional medicine and modern pharmaceutical science. *Mini Reviews in Medicinal Chemistry* **21**, 724-730.

T

Thomas J. E., Bandara M., Driedger D. & Lee E. L. (2011). Fenugreek in western Canada. *Am J Plant Sci Biotech* **5**, 32-44.

V

Varshney H. & Siddique Y. (2023). Medicinal Properties of Fenugreek: A Review. *The Open Biology Journal* **11**, 1-16.

Vavilov N. I. (1926). Studies on the Origin of Cultivated plants. Leningrad: Inst. Appl. Bot. Plant.Breed.

Visuvanathan T., Than L. T. L., Stanslas J., Chew S. Y. & Vellasamy S. (2022). Revisiting *Trigonella foenum-graecum L.*: pharmacology and therapeutic potentialities. *Plants* **11**, 1-14.

W

Wissem A. W. & Brahim M. (2016). Research progress of Tunisian medicinal plants used for acute diabetes. *Journal of Acute Disease* **5**, 357-363.

Y

Yadav U. C. S., & Baquer N. Z. (2014). Pharmacological effects of *Trigonella foenum-graecum L.* in health and disease. *Pharmaceutical Biology* **52**, 243–254.

Yaldiz G. & Çamlıca M. (2021). Assessment of Secondary Metabolites with Different Uses of Fenugreek. In Jose C. J. & Alfonso C. (eds). *Legumes Research* (1-19). Rijeka, intechopen.

Z

Zandi P., Basu S. K., Khatibani L. B., Balogun M. O., Aremu M. O., Sharma M., Kumar A., Sengupta R., Li X., Li Y., Tashi S., Hedi A., & Cetzal-Ix W. (2015). Fenugreek (*Trigonella foenum-graecum L.*) seed: a review of physiological and biochemical properties and their genetic improvement. *Acta Physiologiae Plantarum* **37**, 1-14.

Zameer S., Najmi A.K., Vohora D. & Akhtar M. (2018). A Review on Therapeutic Potentials of *Trigonella Foenum Graecum* (Fenugreek) and Its Chemical Constituents in Neurological Disorders: complementary Roles to Its Hypolipidemic, Hypoglycemic, and Antioxidant Potential. *Nutr. Neurosci* **21**, 539–545.

نبات "الحلبة" (*Trigonella foenum-graecum L*) هو عشب سنوي منتصب ينتمي إلى عائلة البقوليات، ينمو في تربة كلسية ورطبة قليلاً. ثمرة هذا النبات عبارة عن جراب مقوس ممدود يحتوي على 10 إلى 20 بذرة.

الحلبة، سواء في أوراقها أو بذورها، تحتوي على ثروة من العناصر الغذائية بما في ذلك البروتينات والسكريات والألياف والأحماض الدهنية، بالإضافة إلى الفيتامينات والمعادن. بالإضافة إلى ذلك، فإنها معروفة بتنوع مركباتها النشطة بيولوجياً مثل المركبات الستيرويدية، والصابونينات، والقلويدات، والفلافونويدات، والكومارين. هذا النبات مستخدم منذ فترة طويلة في عدة بلدان لأغراض غذائية، وكخضار، وكعلف، وفي الطب التقليدي.

المركبات النشطة بيولوجياً في الحلبة تمنحها خصائص علاجية متنوعة، مثل قدرتها على مكافحة الأورام وتأثيراتها الخافضة لمستوى السكر في الدم والدهون، وتأثيرها المضاد للالتهاب، بالإضافة إلى خصائصها المضادة للفطريات والبكتيريا والفيروسات، وقدرتها على تحفيز إدرار الحليب، وخصائصها المضادة للأكسدة والمحافظة على صحة القلب وحماية المعدة.

الكلمات المفتاحية: نبات الحلبة، البقوليات، ترينجولين، ديوسجينين، فلافونويدات، مركبات فيتوكيميائية.

Résumé

La plante de "fenugrec" (*Trigonella foenum-graecum L.*) est une herbe annuelle, érigée, appartenant à la famille des légumineuses, poussant dans une terre calcaire et un peu humide. Le fruit de cette plante est une gousse allongée, arquée, renfermant de 10 à 20 graines.

Le fenugrec, à la fois dans ses feuilles et ses graines, contient une richesse d'éléments nutritifs incluant des protéines, des sucres, des fibres, des acides gras, ainsi que des vitamines et des minéraux. De plus, il est connu pour sa variété de composés biologiquement actifs comme les composés stéroïdiens, les saponines, les alcaloïdes, les flavonoïdes et les coumarines. Ce végétal est utilisé depuis longtemps dans plusieurs pays à des fins alimentaires, comme légume, pour le fourrage et en médecine traditionnelle.

Les composés biologiquement actifs du fenugrec lui confèrent diverses propriétés thérapeutiques, telles que son potentiel anti-tumoral, ses effets hypoglycémiant et hypolipidémiant, son action anti-inflammatoire, ainsi que ses propriétés antifongiques, antibactériennes, antivirales, galactogènes, antioxydantes, cardioprotectrices et gastroprotectrices.

Mots-clés : *Trigonella foenum-graecum*, fenugrec, Fabaceae, trigonelline, diosgénine, flavonoïdes, composition phytochimique, activité biologique.