

République algérienne démocratique et populaire
وزارة التعليم العالي والبحث العلمي
Ministère de l'enseignement supérieur et de la recherche scientifique
جامعة عين تموشنت بلحاج بوشعيب
Université –Ain Temouchent- Belhadj Bouchaib
Faculté des Sciences et de Technologie
Département de Biologie



Projet de Fin d'Etudes
En vue de l'obtention du diplôme de Master
Domaine : Sciences de la nature et de la vie
Filière : Sciences agronomiques
Spécialité : Production végétale

Thème :

Évaluation de l'efficacité du marc de café sur la croissance de deux espèces maraichères

Présenté Par : Melle. Yeklef Nassera

Devant le jury composé de :

Dr. DERRAG Zineb	M C A	UAT.B.B (Ain Temouchent)	Présidente
Dr. ABDELLAOUI Hadjira	M C B	UAT.B.B (Ain Temouchent)	Examinatrice
Dr. BELGACEM .Amel Fatima	M C B	UAT.B.B (Ain Temouchent)	Encadrante
Pr. ILYES Faiza	Pr	UAT.B.B (Ain Temouchent)	Co-Encadrante

Année 2025/2026

Remerciements

Ce mémoire est le fruit des efforts fournis et des sacrifices consentis par plusieurs personnes que je ne pourrai oublier de remercier. Mes remerciements s'adressent d'abord à Dieu, créateur de toutes choses, pour son souffle et tous ses innombrables bienfaits. Aussi, je remercie mon Directeur de mémoire, MCB Mme.belgacem A et le Professeur Mme .Ilyes F d'avoir accepté de m'encadrer dans la conception et l'élaboration de ce travail, ainsi que pour son dévouement malgré ses nombreuses occupations. J'adresse également mes sincères remerciements aux membres du jury : Mme Abdloui .h , d'avoir accepté de présider ce jury ; Mme Derrag , d'avoir accepté d'examiner et d'évaluer ce travail

Je me dois de remercier plus particulièrement mes parents :mon père et ma mère, pour tous les conseils, et leur amour infini, leurs encouragements constants et tous les sacrifices accomplis tout au long de mes études. »

Je saisis également l'occasion pour remercier mon marie et mes sources ainsi pour leur soutien matériel, financier et moral, sans lequel je n'aurais pu mener à bien ce travail académique. Enfin, j'adresse mes sincères remerciements à toutes les personnes qui ont contribué de près ou de loin à la réalisation de cette étude.

SOMMAIRE

Remerciements

Liste des figures

Liste des tableaux

Liste des abréviations

Résumé

Abstract

الملخص

Chapitre 1 :La marc de café	17
1. Définition du café et de ses principaux composants :	18
2. Description de la plante	18
a) Les racines	18
b) Le tronc	18
c) Les branches	18
d) Les feuilles.....	18
e) Les fleurs	18
f) Les grains	18
4. Le marc de café.....	4
5. Composition des grains de café vert	5
5.1. Caféine.....	5
5.2. Les Acides	5
6.1. La Caféine	7
7.Amélioration du sol et caractéristiques de croissance des plantes à l'aide du marc de café : ...	7
8. Préparation et Utilisations Typiques du Marc de Café Épuisé.....	8
Chapitre 02 : les cultures maraichères.....	10
1. Définition et concept du maraîchage	10
2. Classification des espèces maraichères	10
2.1. Les légumes-fruits.....	10
2.2. Les légumes-feuilles.....	10
2.3. Les légumes-racines et tubercules	10
3. Importance socio-économique et nutritionnelle	10

3.2	.Dynamique économique.....	11
5.1.	Gestion de l'eau et irrigation.....	12
6.	LA TOMATE (Solanum lycopersicum L.....	12
6.1	Définition ET description	12
6.2	:Classification Taxonomique de LA Tomate	12
6.3.	Itinéraire technique	13
6.3.1.	Conditions Pédoclimatiques.....	13
	a) Températures.....	13
	b) Lumière	13
	c) Sol.....	13
6.3.2.	Cycle de Développement et Calendrier	14
	a) Pépinière	14
	b) Stades phénologiques	14
6.3.3 :	Densité de plantation.....	14
6.3.4.	Irrigation	14
6.3.5.	Fertilisation (unités d'apport indicatives)	14
6.3.6.	Opérations d'entretien	14
7.1.	Principales maladies	15
7.2.	Principaux ravageurs	15
8.	LA POMME DE TERRE (Solanum tuberosum L.....	16
8.1.	Définition Et description.....	16
8.2.	Classification Taxonomique de la Pomme de Terre	16
8.3	.Itinéraire Technique.....	16
a)	Densité de plantation	16
b)	Irrigation	16
c)	Fertilisation (unités d'apport indicatives).....	16
d)	Opérations d'entretien	16
a)	Températures.....	17
b)	Lumière	17
c)	Sol.....	17
9.	Protection Phytosanitaire.....	17
Chapitre 3 :	Matériels et Méthodes	20

1. site du travail	21
2. Partie 1/ Plein champ (ex-situ).....	20
3. partie 2 / sous serre (in situ)	21
3.1. Matériel de culture global.....	21
3.2. Culture de la tomate	21
3.3. Culture de la pomme de terre	21
4. Conditions microclimatiques	21
5. Matériel Végétal et Substrat	22
5.1. Espèces étudiées	23
5.2. Caractéristiques de la culture	23
7. La Pomme de terre (<i>Solanum tuberosum</i>)	23
3. Matériel de plantation et calendrier :	24
7.1. Dispositif de culture et support	24
7.2. Substrat de base et amendement	25
7.3. Préparation du marc de café et des solutions d'arrosage (la solution mère)	25
8. Conduite de la Culture et Protocoles d'Application.....	26
8.1.Plantation et mise en place (en Serre et en Plein Champ) :.....	26
8.2. Application des traitements et régime d'irrigation	26
a) Phase d'installation (Démarrage).....	26
b) Phase d'application des traitements (Après développement des plants)	27
Chapitre 04:Résultats et discussion	29
1.L'effet du marc de café sur la croissance des plants de tomate et pommes de terre :	29
a) Sous serre.....	58
b) en plein champ	59
3.Discussion générale:	68
a) Effet biostimulant aux faibles et moyennes concentrations (5% - 10%)	68
b) Phytotoxicité et stress osmotique aux fortes concentrations (15% - 25%).....	69
c). Différence de sensibilité entre la tomate et la pomme de terre	69
4. Comparaison des résultats avec les études et travaux antérieurs	70
4.1. Effet biphasique des concentrations.....	70
4.2. Réponse différentielle selon le système de culture (Plein champ vs Serre)	70
4.3. Variabilité de la réponse selon l'espèce (Tomate vs Pomme de terre	71

Conclusion	72
➤ Effet biostimulant (Dose optimale)	72
➤ Effet phytotoxique	72
➤ Influence du mode de culture.....	72
➤ Ajustement du dosage	72
➤ Compostage préalable	72
➤ Adaptation au mode de culture	72

LISTE DES FIGURES

Figure 01 : La plante de café	04
Figure 02 : Le marc de café	05
Figure 03 : Morphologie et appareil végétatif de la plante de tomate (<i>Solanum lycopersicum</i>)	13
Figure 04 : Le mildiou des tomates	15
Figure 05 : La mineuse de la tomate	15
Figure 06 : Le mildiou de pomme de terre	18
Figure 07 : <i>Leptinotarsa decemlineata</i>	18
Figure 08 : La serre	19
Figure 09 : Le semis des tubercules de pomme de terre Et Le repiquage des plantules de tomate	20
Figure 10 : Préparation des jeunes plantules pour le repiquage	23
Figure 11 : Croissance des plants de pomme de terre cultivés en sacs sous serre	26
Figure 12 : Phase d'ébullition et d'infusion du marc de café au bain-marie	26
Figure 13 : Croissance des plants de tomate après la première semaine d'irrigation par l'extrait de marc de café	30
Figure 14 : Croissance des plants de tomate au milieu de l'expérimentation	32
Figure 15 : État des plants de tomate à la fin de la période d'expérimentation	33
Figure 16 : Croissance des plants de pomme de terre après la première semaine d'irrigation de marc de café	35
Figure 17 : Croissance des plants de pomme de terre après la deuxième semaine	37
Figure 18 : Les plants de pomme de terre après la troisième semaine	39
Figure 19 : Croissance des plants de pomme de terre en plein champ après la première semaine	41

Figure 20 : Croissance des plants de pomme de terre en plein champ après la deuxième semaine	44
Figure 21 : Les plantes de pommes de terre (0%, 5%, 10%, 15%, 20%, 25%)	47
Figure 22 : Croissance et développement des plants de tomate en plein champ durant la première Semaine	50
Figure 23 : Stade d'initiation de la floraison et de la nouaison des plants de tomate en plein champ durant la deuxième semaine	53
Figure 24 : Des limaces accrochées à un plant de tomate	54
Figure 25 : Les plantes de tomates (0%, 5%, 10%, 15%, 20%, 25%)	57
Figure 26 : Effet global des concentrations de marc de café sur la croissance végétative et la fructification des plants de tomate sous serre	59
Figure 27 : Rendement en fruits de tomate pour le témoin (0%)	59
Figure 28 : Rendement en fruits de tomate à la concentration (5%)	60
Figure 29 : Rendement en fruits de tomate à la concentration (10%)	60
Figure 30 : Rendement en fruits de tomate à la concentration (20%)	61
Figure 31 : Rendement en fruits de tomate à la concentration (25%)	61
Figure 32 : Tubercules de pomme de terre récoltés à la concentration (0%)	62
Figure 33 : Tubercules de pomme de terre récoltés à la concentration (5%)	62
Figure 34 : Tubercules de pomme de terre récoltés à la concentration 10%	63
Figure 35 : Tubercules de pomme de terre récoltés à la concentration 15%	63
Figure 36 : Effet de phytotoxicité aiguë et tubercules atrophiés à la concentration 20%	64
Figure 37 : Dessèchement, nécrose totale de l'appareil végétatif et tubercules atrophiés à la concentration (25%)	65
Figure 38 : Tubercules de pomme de terre récoltés pour le témoin (0%)	65
Figure 39 : Tubercules de pomme de terre récoltés à la concentration (5%)	40

Figure 40 : Tubercules de pomme de terre récoltés à la concentration (10%)	40
Figure 41 : Tubercules de pomme de terre récoltés à la concentration (15%)	67
Figure 42 (bis) : Tubercules de pomme de terre récoltés à la concentration (20%)	67
Figure 43 : Tubercules de pomme de terre récoltés à la concentration (25%)	68

LISTE DES TABLEAUX

Tableau 01 : Les cinq plus grands pays producteurs de café au monde	03
Tableau 02 : Les Conditions climatiques	22
Tableau 03 : Répartition quotidienne des volumes de la solution mère et d'eau distillée selon les traitements (Volume total = 1650 ml / bloc) (en plein champ)	27
Tableau 04 : Répartition quotidienne des volumes de la solution mère et d'eau distillée selon les traitements (Volume total 200 ml /sac) Sous serre	28
Tableau 05 : les Tomates (en Serre) - Suivi de l'arrosage au marc de café	29
Tableau 06 : Suivi de l'arrosage au marc de café de la pommes de terre (en Serre)	33
Tableaux 07 : Suivi de l'arrosage au marc de café de la pommes de terre (Plein champ)	39
Tableaux 08 : Suivi de l'arrosage au marc de café sur les Tomates (Plein champ)	48

Liste des abréviations

A.P.G : Angiosperm Phylogeny Group (classification botanique moderne des angiospermes).

B.P.S : Badan Pusat Statistik (Bureau central de la statistique en Indonésie).

F.A.O : Food and Agriculture Organization (Organisation des Nations unies pour l'alimentation et l'agriculture).

F.A.O.STAT : Food and Agriculture Organization Corporate Statistical Database (Base de données statistiques de la FAO).

F.N.C : Federación Nacional de Cafeteros (Fédération nationale des caféiculteurs de Colombie).

I.C.O : International Coffee Organization (Organisation internationale du café).

I.H.C.A.F.E : Instituto Hondureño del Café (Institut hondurien du café).

I.T.C : International Trade Centre (Centre du commerce international).

K₂O : Oxide de potassium / Potasse (formule chimique utilisée en fertilisation).

O.N.M : Office National de la Météorologie.

P₂O₅ : Pentoxyde de phosphore / Anhydride phosphorique (formule chimique utilisée en fertilisation).

PH : Potentiel hydrogène (mesure de l'acidité ou de l'alcalinité d'un milieu).

S.C.G : Spent Coffee Grounds (Marc de café épuisé).

U.N.E.P : United Nations Environment Programme (Programme des Nations unies pour l'environnement - PNUE).

Résumé :

L'agriculture moderne s'oriente vers des pratiques durables visant à réduire la dépendance aux engrais chimiques grâce au recyclage des sous-produits organiques dans le cadre de l'économie circulaire. Cette étude vise à évaluer l'impact de l'extrait aqueux de marc de café sur le développement morpho-physiologique de deux espèces maraîchères majeures de la famille des Solanacées : la tomate (*Solanum lycopersicum*, var. Rio Grande) et la pomme de terre (*Solanum tuberosum*, var. Spunta). L'expérimentation a été conduite à l'Université Belhadj Bouchaïb d'Aïn Témouchent sous deux modes de culture (plein champ et sous serre) en appliquant six concentrations d'extrait aqueux (0%, 5%, 10%, 15%, 20% et 25%). Les résultats obtenus mettent en évidence un effet biphasique dépendant étroitement de la concentration appliquée et du mode de conduite : Faibles et moyennes concentrations (5% à 10%) : Elles ont exercé un effet biostimulant significatif, favorisant la croissance végétative (hauteur de tige, nombre de feuilles) ainsi que l'accélération de la floraison et de la maturation des fruits, grâce à l'apport en éléments minéraux essentiels (Azote, Potassium, Phosphore) et en matière organique assimilable. Fortes concentrations (15% à 25%) : Elles ont induit un stress phytotoxique et osmotique marqué en raison de la présence de métabolites secondaires (caféine, polyphénols, tanins) et d'une forte acidité. Cela s'est traduit par des symptômes de chlorose, d'enroulement, de nécrose foliaire et le dépérissement total des plants (notamment chez la pomme de terre à 25% sous serre). Effet du mode de culture : Les cultures en plein champ ont montré une meilleure tolérance aux fortes concentrations par rapport au milieu protégé (sous serre), grâce au phénomène de lessivage naturel du sol et à l'aération de la rhizosphère. L'étude recommande de ne pas dépasser des doses d'application directe de 5% à 10%, ou de privilégier un co-compostage préalable du marc de café afin de dégrader les composés allélopathiques toxiques avant son utilisation agronomique.

Mots-clés : Marc de café , Tomate, Pomme de terre, Biostimulant, Phytotoxicité, Plein champ, Sous serre.

Abstract

Modern agriculture increasingly relies on sustainable solutions to enhance crop productivity and reduce dependency on chemical fertilizers by recycling organic waste within a circular economy framework. This study aims to evaluate the effect of aqueous extract of Spent Coffee Grounds (SCG) as an organic biostimulant/alternative on the morpho-physiological growth of two major Solanaceae crops: tomato (*Solanum lycopersicum*, var. *Rio Grande*) and potato (*Solanum tuberosum*, var. *Spunta*). The field experiment was conducted at Belhadj Bouchaib University of Aïn Témouchent under two different cultivation systems (open field and greenhouse), applying six different aqueous extract concentrations (0%, 5%, 10%, 15%, 20%, and 25%). The results demonstrated a biphasic effect strongly dependent on the applied concentration and the cultivation system: Low to Moderate Concentrations (5% – 10%): Exhibited a significant biostimulant effect, enhancing vegetative growth (stem height and leaf count) while accelerating flowering, fruiting, and fruit ripening in both tomato and potato plants, due to the high content of essential nutrients (Nitrogen, Potassium, Phosphorus) and organic matter in coffee grounds. High Concentrations (15% – 25%): Induced phytotoxicity and osmotic stress caused by the excessive accumulation of secondary metabolites (caffeine, polyphenols, and tannins) and high acidity. This resulted in leaf chlorosis, curling, necrosis, and complete plant mortality (particularly at 25% concentration in greenhouse potatoes). Cultivation System Effect: Plants grown in the open field displayed greater tolerance to high concentrations compared to those in the greenhouse, attributed to natural soil leaching (lessivage) and direct biodegradation of organic compounds. The study recommends avoiding direct application concentrations exceeding 5% to 10% to prevent phytotoxicity, or subjecting spent coffee grounds to prior composting to decompose harmful allelopathic compounds before agricultural use.

Keywords: Spent Coffee Grounds (SCG), Tomato, Potato, Biostimulants, Phytotoxicity, Open Field, Greenhouse

الملخص

تعتمد الزراعة الحديثة على إيجاد حلول مستدامة لتعزيز إنتاجية المحاصيل وتقليل الاعتماد على الأسمدة الكيميائية، وذلك من خلال إعادة تدوير المخلفات العضوية في إطار الاقتصاد الدائري. تهدف هذه الدراسة إلى تقييم تأثير استخدام كبديل/منشط حيوي عضوي على النمو - المستخلص المائي لتفل القهوة صنف (Solanum lycopersicum) المورفولوجي والفيزيولوجي لنسجين من الفصيلة الباذنجانية: الطماطم (Spunta صنف - Solanum tuberosum) والبطاطس (Grande) بجامعة بلحاج بوشعيب بتموشنت تحت نمطين زراعيين مختلفين (الزراعة الحقلية وفي البيت البلاستيكي/البيت المحمي) أظهرت النتائج أن التأثير باستخدام ست تركيزات مختلفة من المستخلص (0%، 5%، 10%، 15%، 20%، و25%) الجرعات المنخفضة إلى المتوسطة (5% - :مزدوج ويعتمد بالدرجة الأولى على التركيز المستخدم ونمط الزراعة تمثل في زيادة نمو المجموع الخضري (طول) (Biostimulant effect) 10%): أظهرت تأثيراً محفزاً حيوياً ممتازاً الساق وعدد الأوراق وتسريع عملية الإزهار والإثمار ونضج الثمار لدى الطماطم والبطاطس، نظراً لغنى تفل القهوة التركيزات العالية (15% - 25%): بالعناصر المغذية الأساسية (النيتروجين، البوتاسيوم، الفوسفور) والمادة العضوية واجهاد اسموزي ناتج عن التراكم المفرط للمركبات الثانوية (Phytotoxicity) أدت إلى ظهور أعراض سمية نباتية (Necrosis) والحموضة، مما تسبب في اصفرار الأوراق، ثم تساقطها ونخرها (، والتانينات Polyphenols الكافيين،) نمط الزراعة: أظهرت وصولاً إلى الموت الكامل للنباتات (خاصة عند تركيز 25% للبطاطس تحت البيت المحمي) النباتات في الحقل المفتوح تحملاً أكبر للتركيزات العالية مقارنة بالبيت المحمي، ويرجع ذلك لتأثير غسل التربة توصي الدراسة بعدم استخدام المستخلص المائي لتفل والتحلل البيولوجي المباشر للمركبات العضوية (Lessivage) القهوة بتركيزات تتجاوز 5% إلى 10% لتفادي التسمم النباتي، مع إمكانية إخضاع تفل القهوة للتخمير العضوي

الكلمات المفتاحية: المسبق لتفكيك المركبات الكافيينية الضارة والاستفادة الكاملة من قيمته السادية (Composting) تفل القهوة، الطماطم، البطاطس، المحفزات الحيوية، السمية النباتية، الزراعة الحقلية، البيت المحمي

Introduction

L'agriculture moderne fait face à un double défi majeur : répondre à la demande alimentaire croissante tout en adoptant des pratiques respectueuses de l'environnement (**Tilman et al, 2011**). Dans cette optique, la transition vers une agriculture durable impose de réduire la dépendance aux engrais chimiques de synthèse et d'encourager le recyclage des sous-produits organiques (**Reganold & Wachter, 2016**). La valorisation de ces déchets biogéniques s'inscrit pleinement dans les principes de l'économie circulaire, visant à transformer les résidus urbains et industriels en ressources fertiles pour les sols (**Ghosh et al, 2020**). Parmi ces sous-produits, le marc de café suscite un intérêt grandissant dans la recherche agronomique mondiale (**Cervera-Mata et al, 2021**). Généré en quantités massives à l'échelle internationale, ce résidu organique possède des caractéristiques physico-chimiques singulières (**Mussatto et al, 2011**). Bien qu'il soit particulièrement riche en matière organique et en éléments nutritifs essentiels, notamment en azote (**Cruz et al, 2012**), sa forte acidité et sa teneur en composés bioactifs, tels que la caféine, les tannins et les polyphénols, soulèvent des interrogations quant à ses effets phytotoxiques directs sur les cultures à l'état brut (**Hardgrove & Livesley, 2016**). Les cultures maraîchères, à l'instar de la tomate (*Solanum lycopersicum*) et de la pomme de terre (*Solanum tuberosum*), occupent une place stratégique dans la sécurité alimentaire et l'économie agricole globale (**FAO, 2022**). Ces deux solanacées, bien que proches botaniquement, présentent des exigences nutritionnelles et des systèmes racinaires distincts, liés à leur mode de production aérien ou souterrain (**Morra et al, 2021**). L'application du marc de café comme amendement organique sur ces espèces nécessite donc une évaluation rigoureuse pour déterminer l'impact exact de ce résidu sur leur développement morpho-physiologique (**Ronga et al, 2020**).

C'est dans ce contexte que s'inscrit notre travail de recherche, intitulé « Évaluation de l'efficacité du marc de café sur la croissance de deux espèces maraîchères (pomme de terre, tomate) »

L'objectif principal de cette étude est d'analyser l'influence de différentes doses de marc de café brut sur les paramètres de croissance de ces deux cultures. Pour répondre à cette problématique, nous tenterons de vérifier les hypothèses suivantes :

- L'incorporation du marc de café à faible dose améliore les propriétés du substrat et stimule la croissance végétative de la tomate et de la pomme de terre.
- Une concentration excessive en marc de café provoque un effet inhibiteur sur le développement racinaire et foliaire en raison de sa phytotoxicité potentielle.

Chapitre 1 :La marc de café

1. Définition du café et de ses principaux composants :

Le café provient d'un arbuste tropical, le caféier appartenant à la famille botanique des Rubiaceae (**Benmedjahed, 2017**). Sa hauteur peut atteindre 10 à 12 mètres (**Champerals, 1991**).

2. Description de la plante :

Le caféier se distingue par une structure végétative complexe qui assure sa croissance et son alimentation de manière équilibrée. Cette plante se compose des parties suivantes :

- a) **Les racines** : Elles possèdent un pivot court (40 à 50 cm), mais à partir de sa partie inférieure, les racines pivotantes s'enfoncent jusqu'à 1,20 mètre et plus en profondeur. Cet ensemble de racines approvisionne le caféier en eau (**Wintgens, 2009**).
- b) **Le tronc** : Les caféiers peuvent être à tronc « unique » ou « multiple », selon l'espèce et l'origine du caféier (**Coste, 1992**) et Le collet C'est la zone intermédiaire entre les racines et le tronc. C'est une partie sensible, particulièrement chez les jeunes caféiers (**Cambrony, 1989**).
- c) **Les branches** : Elles sont longues et fines, plus ou moins horizontales et opposées deux à deux (2×2). Elles peuvent donner naissance à des branches secondaires et parfois à des branches tertiaires (**Coste, 1992**).
- d) **Les feuilles** : Elles sont de forme ovale, opposées deux à deux (2×2), avec une bordure plus ou moins ondulée, un pétiole court, et une couleur vert foncé brillant (**Wintgens, 2009**). Chez caféier canéphore « Robusta », les feuilles peuvent atteindre une longueur de 20 à 30 cm et une largeur de 8 cm (**Champerals, 1991**).
- e) **Les fleurs** : Elles sont blanches, petites, parfumées au jasmin et regroupées en « glomérules » de 15 à 30 fleurs (**Benmedjahed, 2017**). La fleur fécondée produit un fruit (baie), souvent appelé « cerise » en raison de sa forme arrondie et de sa couleur rouge à pleine maturité (**Champerals, 1991**).
- f) **Les grains** : Souvent appelés « fèves », ils sont de couleur grisâtre et composés d'un endosperme corné à surface lisse, dont la face plane est traversée par un sillon, et d'un petit embryon doté d'une radicule et de deux cotylédons (**Illy & Viani, 2005**). Le temps requis pour le développement du fruit, de la floraison à la maturité, est d'environ dix à onze mois [pour le Robusta] (**Wintgens, 2009**). Les grains de Robusta mesurent de 8 à 16 mm de long, avec un poids moyen actuel de 0,10 g à 0,15 g (un bon « calibre de grain » équivaut à 13 grammes pour 100 grains) (**Champerals, 1991**).

Le café est la deuxième matière première la plus échangée au monde, avec une production annuelle dépassant les neuf milliards de kilogrammes (19 milliards de livres) (**IndexMundi, 2024 / ICO, 2024**).

Le tableau N°01 suivant montre le taux de consommation quotidienne de plusieurs pays à travers le monde, où l'Algérie s'est classée au huitième rang mondial avec un taux de 8,1 [en kg par habitant ou selon l'indice spécifié] (**ICO Statistics / World Atlas, 2024**). Cette situation est jugée préoccupante si l'on considère les quantités massives de déchets générées par son utilisation unique avant élimination (**UNEP, 2023**).

Tableau N°1 :Les cinq plus grands pays producteurs de café au monde (**ICO, 2024**).

<i>Pays</i>	<i>Volume de production</i>
<i>Brésil</i>	<i>3 164 100 tonnes (ICO, 2024)</i>
<i>Vietnam</i>	<i>1 770 000 tonnes (FAOSTAT, 2023)</i>
<i>Colombie</i>	<i>840 000 tonnes (FNC, 2024)</i>
<i>Indonésie</i>	<i>654 120 tonnes (BPS Indonesia, 2023)</i>
<i>Honduras</i>	<i>462 000 tonnes (IHCAFE, 2023)</i>

Le café est la deuxième matière première la plus échangée au monde, avec une production annuelle dépassant les neuf milliards de kilogrammes (19 milliards de livres) (**IndexMundi, 2024 / ICO, 2024**).

Le café est cultivé dans plus de 70 pays, et sa production globale totale atteint plus de 16 milliards de livres par an . Le café est également considéré comme l'une des boissons les plus consommées au monde, avec un taux de consommation quotidienne estimé à environ 2,5 milliards de tasses à travers le globe (**ITC, 2023**) Ainsi, on distingue (Figure 01).



Figure 01: la plante de café

3 :Classification scientifique du caféier :

Aujourd'hui, nous connaissons environ 80 espèces différentes au sein du genre caféier. Seules deux espèces présentent un réel intérêt pour la production de café (**Guyhaler, 2013**). Il s'agit de caféier Arabica (**Linnaeus**) qui produit le café Arabica, et de caféier canéphore (**Pierre**) qui produit le café Robusta (**Linnaeus, 1753 ; Pierre, 1897**). Cette classification D'après (APG IV ,2016)

Règne : Plantae

Division : Angiospermae

Classe : Euasterids

Ordre : Gentianales

Famille : Rubiaceae

Sous_famille : Ixoroideae

Genre : caféier

Espèces : caféier Arabica et caféier canéphore

4. Le marc de café :

L'industrie du café a connu une croissance continue (**ICO, 2020**) ; par conséquent, d'importantes quantités de résidus sont générées à travers le monde (**Murthy & Naidu, 2012**). Parmi les principaux résidus qui correspond aux restes solides obtenus après la préparation des

boissons de café (**Mussatto et al., 2011**). Il est utilisé comme engrais organique dans les cultures locales (**Cervera-Mata et al., 2018**). (Figure 02)



Figure 02 : La marc de café

5. Composition des grains de café vert :

Les grains de café vert se caractérisent par une composition chimique riche et complexe, regroupant une grande variété de composés bioactifs qui déterminent non seulement la qualité et les propriétés organoleptiques du café, mais jouent également un rôle clé dans la défense naturelle de la plante. Elle se compose des parties suivantes :

5.1. Caféine :

La caféine (1,3% ,7-triméthylxanthine}) est un alcaloïde purique qui constitue environ 1,5% du grain de café vert. Elle joue un rôle protecteur en raison de ses propriétés antifongiques et potentiellement insecticides (**Montavon et al., 2003**). Sa teneur dans les grains de café vert dépend principalement de la variété de café elle est nettement plus élevée pour le Robusta (1,2% à 3,3% de la masse par rapport à la matière sèche) comparativement à l'Arabica (0,9% à 2,1%) (**Martin et al., 1998**).

5.2. Les Acides :

L'acidité est l'une des caractéristiques les plus importantes du café, au même titre que l'amertume ou l'arôme. Le pH moyen des grains de café vert est d'environ 5,5 (**Franca et al, 2005**). Plusieurs types d'acides contribuent à cette acidité :

les acides aliphatiques, chlorogéniques (composés majoritaires), alicycliques et phénoliques. Les acides chlorogéniques sont une famille d'esters formés entre certains acides transcinnamiques (caféique ou férulique) et l'acide quinique. Ils représentent environ 7% à 10% et 5% à 7,5% de la masse de la matière sèche respectivement pour le Robusta et l'Arabica (Fischer *al*, 2001).

5.3 .Protéines et Acides Aminés Libres :

Les acides aminés présents dans le café vert sont principalement liés aux protéines, la fraction libre ne représentant que environ 5% du total, avec une teneur nettement plus élevée pour le Robusta par rapport à l'Arabica (Hiramoto *et al*, 1998).

5.4 . Les Glucides (Hydrates de carbone) :

Les glucides représentent environ 48% à 60% de la matière sèche du café vert. caféier Arabica est généralement un peu plus riche en glucides que caféier canéphore (Robusta). Ils sont composés de glucides cytoplasmiques solubles (monosaccharides, oligosaccharides et polysaccharides) et de glucides insolubles constituant les parois végétales (hémicellulose et holocellulose). Le mannose semble être le monosaccharide majoritaire (environ 45%), suivi du galactose (25%), de l'arabinose (17%) et du glucose (10%) (Oosterveld *al*, 2003 / Carrera *al*, 1998).

5.5. Les Lipides :

Les grains de café vert de caféier Arabica contiennent en moyenne 12% à 20% de lipides totaux, tandis que ceux de caféier canéphore en contiennent 9% à 17% (Debry *et al*, 1995). Les lipides du grain sont répartis entre la couche externe entourant le grain 0,2% à 0,3% des lipides totaux, composée de cires) et l'endosperme (connu sous le nom d'huile de café).

Les lipides sont constitués de nombreux composants : triglycérides (en très grande majorité), acides gras libres, esters de diterpènes, diterpènes libres, triterpènes, stérols, esters de méthylstérols, hydroxytryptamides, tocophérols et phospholipides (Speer *et al*, 2006 / Silwar *et al*, 2010)

6 :Composition des grains de café torréfié :

Alcaloïdes et Acides Les cendres de café représentent environ 3% à 4,5% de la matière sèche (López-Martínez *et al*, 2006). La composition minérale moyenne des grains verts, exprimée en pourcentage de la matière sèche, est Le potassium représente 1,63% à 2%, le magnésium 0,16% à 0,31%, les sulfates 0,13%, le calcium 0,035% à 0,07%, et les phosphates 0,13%

à 0,22% de la matière sèche (**Inoue et al., 1998**). La grande majorité (90%) des minéraux est soluble dans l'eau et se retrouve ainsi dans la boisson (**Debry et al., 1995**).

6.1. La Caféine :

les Acides La torréfaction n'a pas d'effet significatif sur la teneur en caféine du café (**Franca et al., 2005**). Cependant, l'acidité diminue pendant la torréfaction, avec un pH moyen proche de 6, voire 6,5 pour les cafés de qualité inférieure (**Franca et al., 2005**). Les différents acides (aliphatiques, chlorogéniques, alicycliques et phénoliques) constituent environ 6% de la masse du grain (**Franca et al., 2005**).

6.2 .Protéines et Acides Aminés :

Sous l'effet de la torréfaction, et selon son intensité, les acides aminés libres subissent une perte de 20% à 40% en raison de la destruction d'une partie des protéines (**Montavon et al., 2003**).

6.3 . Les Glucides :

La torréfaction entraîne l'altération et la dégradation des glucides ontologiquement présents dans le café vert, notamment en induisant des réactions de dépolymérisation, des modifications structurales ou des condensations avec les protéines ou des fragments protéiques (**Campa et al., 2005**). Ainsi, les glycoprotéines, les glucides solubles, l'holocellulose des grains verts et les monosaccharides comme le galactose, le mannose, l'arabinose et le ribose sont libérés (**Campa et al., 2005**). Le saccharose est quant à lui dégradé à hauteur de 97% à 100% selon le degré de torréfaction (**Campa et al., 2005**).

En réagissant avec les acides aminés (libres ou liés), les monosaccharides (glucose, fructose, arabinose et galactose) forment des polymères bruns (notamment les mélanoidines) et des composés aromatiques par le biais de la réaction de Maillard ; des produits de pyrolyse se forment également. Cela entraîne une diminution de la teneur totale en glucides allant de 20% à 37% selon le degré de torréfaction, en tenant compte de la perte de matière sèche qui est d'environ 8% (**Carrera et al., 1998**).

7.Amélioration du sol et caractéristiques de croissance des plantes à l'aide du marc de café :

L'utilisation du marc de café épuisé comme amendement du sol offre une méthode efficace et durable pour valoriser ce sous-produit urbain sous-exploité (**Zaleet kelsa & Tenaw, 1998**).

Ce marc de café peut apporter des bénéfices similaires pour la croissance des plantes et les propriétés du sol à ceux d'autres amendements organiques tels que le fumier, le biochar, le lombricompost (vermicompost) et le compost (**Zaleet kelsa & Tenaw, 1998**).

Ces amendements fournissent des nutriments essentiels, en particulier de l'azote, tout en améliorant considérablement la capacité du sol à retenir l'eau et les éléments nutritifs (**Zaleet kelsa & Tenaw, 1998**). De plus, ils favorisent l'infiltration de l'eau, améliorent la structure globale du sol et augmentent sa capacité tampon contre le lessivage des nitrates et les variations de pH (**Zaleet kelsa & Tenaw, 1998**).

Enfin, cette pratique stimule l'activité biologique du sol et renforce sa résistance face aux agents pathogènes (**Zaleet kelsa & Tenaw, 1998**).

8. Préparation et Utilisations Typiques du Marc de Café Épuisé :

Le marc de café épuisé est un sous-produit organique précieux. En science agronomique et environnementale, il ne s'agit pas de le « fabriquer » à partir de rien, mais plutôt de le collecter, le stabiliser et le conditionner correctement pour éviter sa dégradation microbiologique avant son application au sol (**Cervera-Mata et al, 2018**).

8.1 .Protocole de Préparation et de Stabilisation :

Le marc de café brut sortant des machines de percolation est saturé d'eau, affichant une humidité relative d'environ 60 à 70 %. Si ce sous-produit est stocké tel quel en état d'anaérobiose, il développe des moisissures et des champignons phytotoxiques en moins de 48 heures (**Hardgrove & Livesley, 2016**).

Pour sa collecte, il est essentiel de sélectionner un marc 100 % pur, exempt de sucre, de lait ou d'additifs qui altéreraient la dynamique microbienne naturelle de la rhizosphère (**Cruz et al, 2012**).

La stabilisation par séchage est l'étape la plus cruciale elle peut s'effectuer soit par voie thermique en étuve de laboratoire à une température de 60°C à 80°C pendant 1 à 2 heures, soit par séchage solaire naturel en étalant le marc en couche fine (environ 5 mm) pendant 2 à 3 jours avec un remuage régulier (**Kammoun et al, 2017**). Une fois le produit totalement fluide et déshydraté, il doit être conservé dans des bocaux hermétiques à l'abri de la lumière et de l'humidité (**Cervera-Mata et al, 2018**).

8.2 . Types d'Utilisations Typiques en Agriculture :

➤ **Type 1 : L'Amendement Direct du Sol (Incorporation Solide) :**

Le marc de café séché et stabilisé est incorporé directement dans la couche supérieure de la matrice de culture. Les protocoles agronomiques recommandent un dosage optimal ne dépassant pas 5 % à 10 % du volume total du sol, car des concentrations excessives peuvent induire une phytotoxicité transitoire due à la caféine résiduelle (**Hardgrove & Livesley, 2016**). Cet amendement direct assure une libération progressive de la matière organique et une minéralisation de l'azote (N) à long terme, tout en améliorant la porosité, la structure des agrégats et la capacité de rétention d'eau du sol (**Zaleet Kelsa & Tenaw, 1998 /Morais et al, 2022**).

➤ **Type 2 : Le Co-compostage et Vermicompostage :**

Cette méthode biologique est considérée comme la plus efficace pour neutraliser les composés organiques potentiellement inhibiteurs (tels que les tanins, les polyphénols et la caféine).

Le marc de café est intégré dans le processus de compostage en tant que matériau « vert » en raison de son rapport Carbone/Azote favorable (C/N proche de 20) (**Ronga et al, 2020**). Le mélange idéal consiste à combiner environ 20 % de marc de café avec des matières carbonées comme de la paille ou des feuilles mortes. Après quelques mois de maturation, ou via l'action des vers de terre (vermicompost), on obtient un amendement mûr, hautement assimilable et extrêmement bénéfique pour l'activité biologique globale de la zone racinaire (**Vardon et al, 2013**).

➤ **Type 3 : L'Extrait Aqueux (Amendement Liquide) :**

L'utilisation sous forme liquide est privilégiée pour des applications précises en fertigation ou en traitement foliaire. Le protocole consiste à faire macérer une quantité définie de marc de café sec (par exemple 100 g) dans un volume précis d'eau distillée (par exemple 1 Litre) afin d'obtenir une solution mère à 10 %, laissée au repos pendant 24 à 48 heures sous agitation régulière (**Ballesteros et al, 2014**). Après une filtration rigoureuse sur tissu ou papier filtre de laboratoire pour éliminer toutes les fractions particulières solides, le liquide obtenu riche en nutriments hydrosolubles et en antioxydants est appliqué pour l'arrosage ou la stimulation des mécanismes de défense naturelle des plantes contre divers agents pathogènes (**Melo et al, 2020**).

Chapitre 02 : les cultures maraichères

1. Définition et concept du maraîchage :

La culture maraîchère désigne la branche de l'horticulture spécialisée dans la production intensive de plantes légumières, de condiments et de certains petits fruits destinés à l'alimentation humaine (**Baudoin *et al*, 2013**). Contrairement aux grandes cultures de plein champ, le maraîchage se caractérise historiquement par des cycles de culture courts, une rotation rapide sur de petites surfaces et une haute valeur ajoutée par unité de surface (**Messiaen, 1992**).

2. Classification des espèces maraîchères :

En agronomie, les cultures maraîchères sont généralement classées selon l'organe consommé ou selon leur appartenance botanique :

2.1. Les légumes-fruits : Les plantes dont on consomme le fruit biologique, appartenant majoritairement à la famille des Solanacées comme la tomate et la pomme de terre, ou des Cucurbitacées comme le concombre (**Pitrat & Foury, 2003**).

2.2. Les légumes-feuilles : Espèces cultivées pour leur feuillage, telles que la laitue, les épinards ou le chou (**Messiaen, 1992**).

2.3. Les légumes-racines et tubercules : Espèces dont les organes souterrains accumulent des réserves, comme la carotte ou la pomme de terre (**Baudoin *et al*, 2013**).

3. Importance socio-économique et nutritionnelle :

Les cultures maraîchères occupent une place stratégique dans le développement global des territoires. À la croisée des enjeux de santé publique et de dynamisme territorial, elles constituent un pilier essentiel pour le bien-être des populations et le développement économique local, tout en structurant durablement les filières agricoles.

3.1 .Sécurité alimentaire et nutrition :

Les cultures maraîchères jouent un rôle crucial dans l'équilibre nutritionnel mondial en fournissant l'essentiel des vitamines, des minéraux et des fibres alimentaires nécessaires à l'organisme humain (**FAO, 2017**). Elles contribuent directement à la diversification des régimes alimentaires et à la lutte contre les carences en micronutriments (**Aujmann *et al*, 2015**).

3.2 .Dynamique économique :

Sur le plan économique, le maraîchage génère des revenus réguliers et rapides pour les exploitants agricoles en raison de la brièveté des cycles biologiques (**Baudoin et al, 2013**). C'est un secteur fortement créateur d'emplois, nécessitant une main-d'œuvre importante pour les opérations de pépinière, de repiquage, d'entretien et de récolte manuelle (**FAO, 2017**).

4 :Les différents systèmes de production maraîchère :

Le maraîchage s'adapte aux conditions climatiques et socio-économiques à travers trois grands systèmes :

a).Le maraîchage de plein champ :

Ce système repose sur des parcelles ouvertes où les cultures dépendent directement des facteurs climatiques saisonniers (**Messiaen, 1992**). Bien que les coûts d'installation soient limités, les cultures y sont vulnérables aux aléas météorologiques et aux pressions des ravageurs (**Baudoin et al, 2013**).

b).Le maraîchage sous serre :

La culture sous abri plastique ou vitré permet un contrôle partiel ou total des facteurs environnementaux tels que la température, l'hygrométrie et l'irrigation (**Baudoin et al, 2013**). Ce système intensif optimise les rendements, prolonge les calendriers de production et protège les cultures sensibles des agressions extérieures (**Pitrat & Foury, 2003**).

c).Le maraîchage urbain et périurbain :

Développé à la périphérie des grandes agglomérations, ce système vise à approvisionner rapidement les marchés urbains en produits frais, réduisant ainsi les coûts de transport et les pertes post-récolte (**Aujmann et al, 2015**).

5 : Principales exigences agronomiques :

La réussite et la productivité des cultures maraîchères reposent sur le respect strict de leurs exigences agronomiques fondamentales. Étant généralement très sensibles aux variations de leur environnement immédiat, ces cultures nécessitent un ajustement précis des facteurs de production notamment l'eau, les nutriments, le type de sol et les conditions microclimatiques afin de garantir un développement optimal et un rendement de qualité.

5.1. Gestion de l'eau et irrigation :

En raison de leur forte teneur en eau (souvent supérieure à 85 %), les cultures maraîchères ont des besoins hydriques élevés et réguliers (**Messiaen, 1992**). Le recours à des systèmes d'irrigation précis, comme le goutte à-goutte, est indispensable pour maximiser l'efficacité de l'eau et éviter le stress hydrique (**Baudoin et al, 2013**).

5.2 .Fertilisation et nutrition carbonée :

Les cycles courts et intensifs exigent une disponibilité immédiate en nutriments (Azote, Phosphore, Potassium). L'application d'amendements organiques et la valorisation des biodéchets stabilisés constituent des leviers agronomiques essentiels pour maintenir la fertilité et la structure microbiologique des sols maraîchers (**FAO, 2017**).

6. LA TOMATE (*Solanum lycopersicum* L) :**6.1 Définition ET description :**

La tomate (*Solanum lycopersicum* L) est une espèce de plantes herbacées de la famille des Solanacées, originaire d'Amérique du Sud (région andine) et largement cultivée pour son fruit charnu consommable. Botaniquement, le fruit est une baie polysperme (contenant de nombreuses graines).

6.2:Classification Taxonomique de LA Tomate :

Règne : Plantae

Division : Tracheophyta

Classe : Magnoliopsida

Ordre : Solanales

Famille : Solanaceae

Sous-famille : Solanoideae

Genre : Solanum

Espèce : Solanum lycopersicum

Cette classification D'après (APG IV ,2016).

Voici la plante de tomate (figure 03)

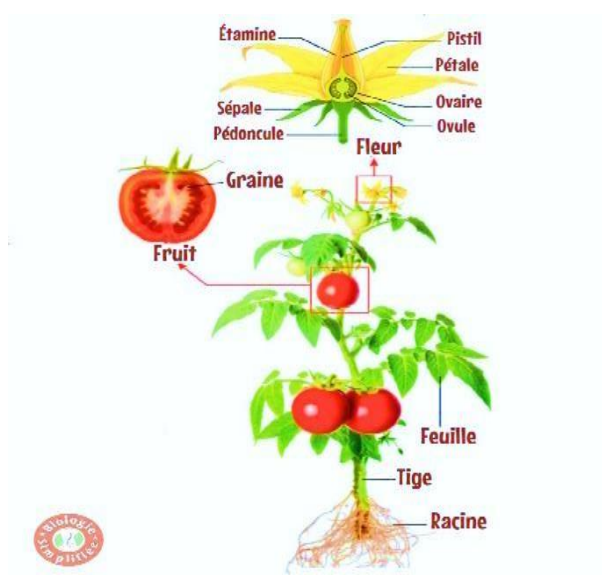


Figure 03: Morphologie et appareil végétatif de la plante de tomate

6.3. Itinéraire technique :

regroupe l'ensemble des interventions et des choix agronomiques nécessaires à la conduite optimale de la culture de la tomate. Il vise à maximiser le rendement et la qualité des fruits en adaptant les pratiques agricoles aux exigences biologiques de la plante.

6.3.1. Conditions Pédoclimatiques :

a) Températures : La tomate est une plante de climat chaud, le zéro végétatif se situant à 10-12°C, avec un optimum thermique de croissance compris entre 20°C et 25°C le jour, et 15°C à 17°C la nuit (**Jones, 2007**). Les températures supérieures à 35°C perturbent fortement la viabilité du pollen et induisent la coulure des fleurs (**Messiaen, 1992**).

b) Lumière : C'est une plante héliophile qui exige une forte intensité lumineuse pour optimiser la photosynthèse et la coloration des fruits via la synthèse du lycopène (**Grierson & Kader, 1986**).

c) Sol : Elle préfère les sols profonds, meubles, riches en matière organique et bien drainés, tolérant un pH optimal compris entre 6,0 et 6,8 (**Jones, 2007**).

6.3.2. Cycle de Développement et Calendrier :

a) Pépinière : Le semis s'effectue en plaques alvéolées, la germination demandant 4 à 8 jours à une température constante de 20°C (**Baudoin et al, 2013**). Les plants restent en pépinière environ 30 à 40 jours jusqu'au stade 4-5 feuilles vraies (**Pitrat & Foury, 2003**).

b) Stades phénologiques : Le cycle complet varie de 90 à 140 jours après repiquage selon les variétés, passant par la reprise, le développement végétatif, la floraison, la nouaison, le grossissement des fruits et la maturité (**Jones, 2007**).

6.3.3 : Densité de plantation : En culture tuteurée (sous serre), la densité recommandée est de 2,5 à 3 plants par mètre carré, avec un espacement typique de 80 cm à 100 cm entre les lignes et 40 cm à 50 cm entre les plants sur la ligne (**Baudoin et al, 2013**).

6.3.4. Irrigation : Les besoins hydriques sont stricts, oscillant entre 600 mm et 800 mm d'eau par cycle (**FAO, 2017**). Le système de goutte-à-goutte est privilégié pour éviter les fluctuations d'humidité qui provoquent la nécrose apicale ou cul-noir (**Jones, 2007**).

6.3.5. Fertilisation (unités d'apport indicatives) : Pour un rendement standard, les exportations moyennes nécessitent l'apport de 150 à 200 kg/ha d'Azote, 80 à 100 kg/ha de Phosphore (P₂O₅) et 250 à 300 kg/ha de Potassium (K₂O), le potassium étant crucial lors

6.3.6. Opérations d'entretien : Les variétés à croissance indéterminée imposent un tuteurage rigoureux, un ébourgeonnage régulier (élimination des gourmands axillaires) et un effeuillage de la base pour aérer le feuillage (**Baudoin et al, 2013**).

7. Protection Phytosanitaire :

La protection phytosanitaire de la tomate repose sur une surveillance rigoureuse et une stratégie de lutte intégrée visant à limiter les pertes de rendement.

7.1. Principales maladies : Le mildiou (*Phytophthora infestans*) et l'alternariose (*Alternaria solani*) attaquent le feuillage en conditions humides, tandis que le flétrissement bactérien (*Ralstonia solanacearum*) bloque les vaisseaux conducteurs (**Messiaen, 1992**) (Figure 04).



Figure 04 : Le mildiou des tomates (Yeklef 2026)

7.2. Principaux ravageurs : La mineuse de la tomate (*Tuta absoluta*), les aleurodes (*Bemisia tabaci*) vecteurs de virus, et les nématodes à galles (*Meloidogyne* spp.) qui détruisent le système racinaire (**Baudoin et al, 2013**) (Figure 05) .

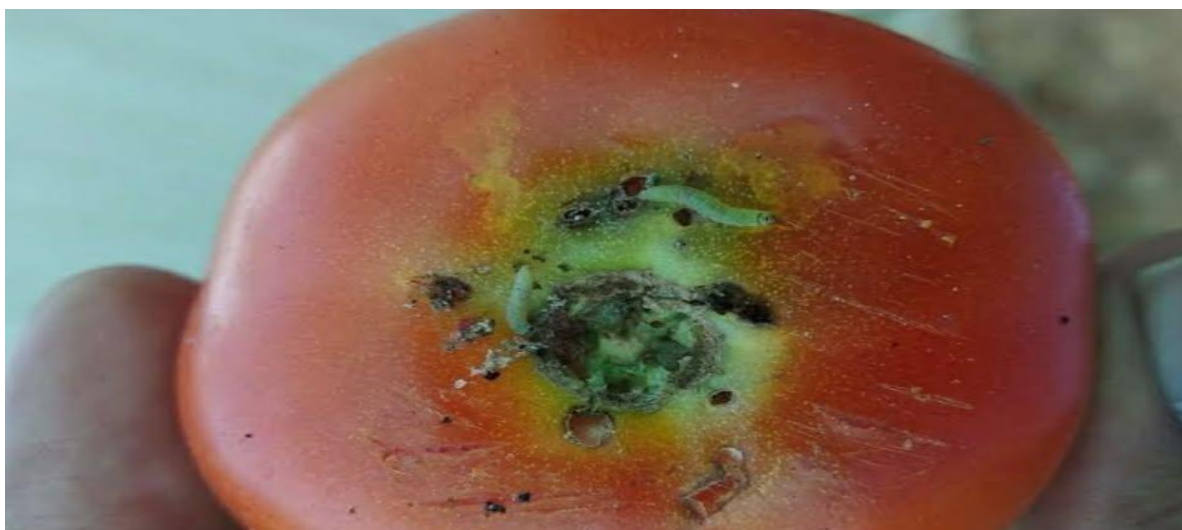


Figure 05 : La mineuse de la tomate (Yeklef 2026)

8. LA POMME DE TERRE (*Solanum tuberosum* L):

8.1. Définition Et description :

La pomme de terre (*Solanum tuberosum*) est une espèce de plante herbacée vivace, cultivée comme une annuelle, appartenant à la famille des Solanacées. Originaires de la chaîne des Andes en Amérique du Sud, elle est cultivée pour ses tubercules souterrains riches en amidon, qui constituent l'un des aliments de base majeurs de l'alimentation humaine à l'échelle mondiale.

8.2. Classification Taxonomique de la Pomme de Terre :

Règne : Plantae

Division : Magnoliophyta

Classe : Magnoliopsida

Ordre : Solanales

Famille : Solanaceae

Sous-famille : Solanoideae

Genre : Solanum

Espèce : Solanum tuberosum L

Cette classification D'après (Judd et al. 2002)

8.3. Itinéraire Technique :

a) Densité de plantation : La densité moyenne varie entre 40 000 et 45 000 plants par hectare. Les lignes sont généralement espacées de 75 cm, avec un écartement de 30 cm à 35 cm entre les tubercules sur le rang (**Hawkes, 1990**).

b) Irrigation : Bien que modérés au début, les besoins en eau deviennent critiques lors du stade d'initiation et de grossissement des tubercules, nécessitant entre 450 mm et 600 mm d'eau par cycle pour éviter les déformations ou les fentes de croissance (**FAO, 2008**).

c) Fertilisation (unités d'apport indicatives) : C'est une culture très exigeante en potasse. Les recommandations moyennes de fumure sont de 120 à 150 kg/ha d'Azote (un excès retarde la tubérisation), 100 à 120 kg/ha de Phosphore (P₂O₅) pour le développement racinaire, et 200 à 250 kg/ha de Potassium (K₂O) pour accumuler l'amidon dans les tubercules (**Ewing & Struik, 1992**).

d) Opérations d'entretien : Le buttage est une opération mécanique obligatoire réalisée 3 à 4 semaines après la levée ; il protège les tubercules de la lumière (évitant le verdissement toxique par la solanine) et maintient l'humidité de la butte (**Hawkes, 1990**). Le défanage (destruction

chimique ou mécanique du feuillage) intervient 15 jours avant la récolte pour durcir la peau des tubercules (FAO, 2008).

8.4.Exigences Pédoclimatiques :

a) Températures : La pomme de terre est une culture de climat tempéré frais. La croissance des tiges aériennes est optimale entre 20°C et 25°C, mais le processus physiologique de tubérisation requiert des températures nocturnes fraîches, idéalement comprises entre 15°C et 18°C (Ewing & Struik, 1992). Au-delà de 29°C, la tubérisation s'arrête complètement (Vreugdenhil & Struik, 1989).

b) Lumière : Des conditions de jours courts (photopériode décroissante) agissent comme un signal hormonal majeur qui déclenche l'induction de la tubérisation (Ewing & Struik, 1992).

c) Sol : Elle exige des sols légers, meubles, profonds, de texture sablo-limoneuse et sans cailloux pour permettre l'extension libre des tubercules (Hawkes, 1990). Le pH idéal se situe entre 5,5 et 6,5, l'acidité limitant naturellement certaines maladies de la peau (Lacey & Wilson, 1986). plants préalablement triés (Hawkes, 1990).

8.5.Cycle de Développement et Calendrier :

- **Stades phénologiques :** Le cycle s'étend sur 90 à 120 jours pour les variétés précoces et jusqu'à 150 jours pour les variétés tardives (Ewing & Struik, 1992). Les grands stades sont la levée (émergence des tiges), la croissance végétative, l'initiation des tubercules (crochetage des stolons), le grossissement des tubercules et la sénescence du feuillage (Vreugdenhil & Struik, 1989).

9. Protection Phytosanitaire :

La protection phytosanitaire de la pomme de terre vise à préserver la santé du feuillage et la qualité commerciale des tubercules face aux contraintes parasites.

9.1.Principales maladies : Le mildiou de la pomme de terre (*Phytophthora infestans*) provoque des brûlures destructrices sur feuilles et tubercules en climat frais et humide (**Lacey & Wilson, 1986**). Le rhizoctone brun (*Rhizoctonia solani*) provoque des déformations, et la gale commune (*Streptomyces scabies*) altère l'épiderme (**Lacey & Wilson, 1986**) (Figure 06).



Figure 06 : le mildiou de pomme de terre (Yeklef 2026)

9.2 :Principaux ravageurs : Le doryphore (*Leptinotarsa decemlineata*) dont les larves défolient totalement les plantes, les pucerons vecteurs de viroses, et la teigne de la pomme de terre (*Phthorimaea operculella*) qui creuse des galeries dans les tubercules au champ et au stockage (Hawkes, 1990) (Figure 07).



Figure 07 : *Leptinotarsa decemlineata*

Chapitre 3 : Matériels et Méthodes

L'objectif principal de cette étude est d'évaluer l'effet de différentes concentrations d'extrait de marc de café sur le développement morpho-physiologique de deux espèces maraîchères majeures appartenant à la famille des Solanacées : la tomate (*Solanum lycopersicum*) et la pomme de terre (*Solanum tuberosum*). Pour analyser la réponse de ces deux cultures face aux traitements appliqués, l'expérimentation a été structurée selon deux modes de conduite distincts : une culture en extérieur (plein champ) et une culture en intérieur (sous serre).

1. site du travail :

L'expérimentation a été conduite au niveau de l'**Université Belhadj Bouchaïb d'Aïn Témouchent**, à proximité immédiate de la serre expérimentale en date du 11 mars et du 21 avril (Figure 08).

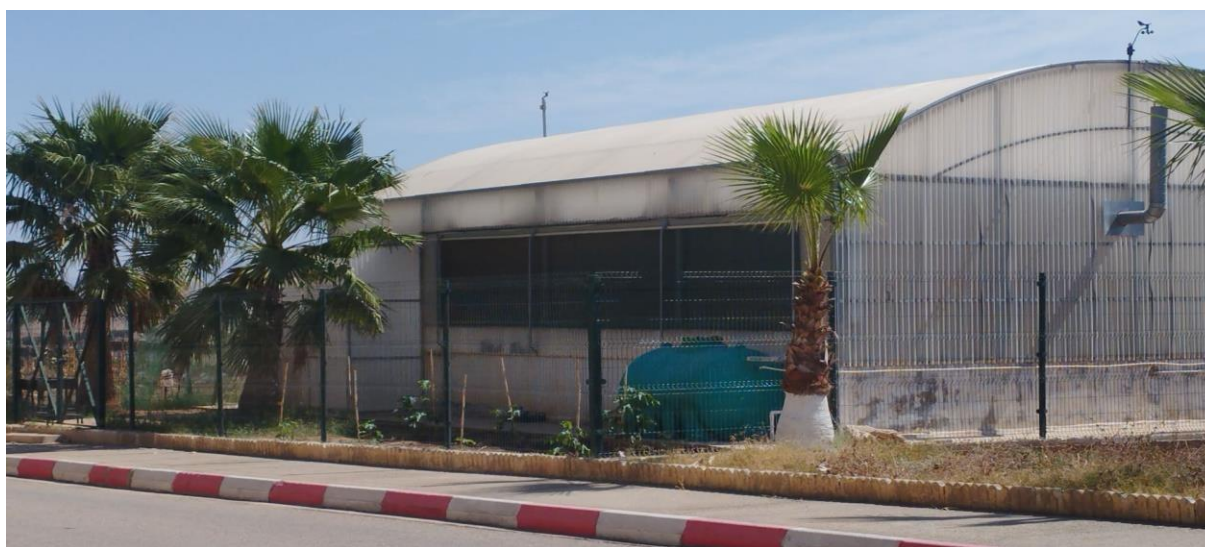


Figure 08 : la serre

Le site d'essai se situe aux coordonnées géographiques exactes suivantes :

Latitude : 35.2927993°N

Longitude : -1.1206913°O

Altitude : environ 260m

Cette étude s'articule autour de deux volets complémentaires : une expérimentation in situ sous serre afin de contrôler rigoureusement les facteurs environnementaux, et un essai ex situ en plein champ pour évaluer les performances en conditions réelles.

2. Partie 1/ Plein champ (ex-situ) :

Le dispositif expérimental comprend **deux parcelles distinctes** installées en plein champ une parcelle réservée à la culture de la tomate (*Solanum lycopersicum*) et une autre dédiée à la pomme de terre (*Solanum tuberosum*) Dans chaque ligne/section de la parcelle en plein champ, deux (02) plants de tomate et deux (02) tubercules de pomme de terre ont été installés de manière homogène en date du 11 mars et du 21 avril .

Dimension d'une parcelle : Chaque parcelle couvre une superficie de **9 m²**(3m×3m)

Superficie totale de l'essai :La surface globale occupée par les deux parcelles est de **18m²**

Subdivision des parcelles :Chaque parcelle est subdivisée de manière régulière en **6 sections** équivalentes (d'une longueur de **0.5m** chacune sur **3m** de largeur), correspondant aux

6 concentrations appliquées (0%, 5%, 10%, 15%, 20% et 25%)



Figure 09 : La semis des tubercules de pomme de terre et Le Repiquage des Plantule de tomate (yeklef 2026)

3. partie 2 / sous serre (in situ) :

Afin de garantir un contrôle rigoureux des facteurs microclimatiques et d'éviter tout contact direct avec le sol de la serre, le second volet de l'expérience a été réalisé en intérieur sous forme de culture hors-sol.

3.1. Matériel de culture global : Cet essai a été réalisé dans des sacs en plastique noir disposés directement sur une table d'expérimentation surélevée. Un total de (12) sacs a été utilisé.

3.2. Culture de la tomate : Un ensemble de (6) sacs en plastique a été spécifiquement dédié à la transplantation et au suivi des plants de tomate (*Solanum lycopersicum*).

3.3. Culture de la pomme de terre : Un ensemble de (6) sacs en plastique a été réservé exclusivement à la plantation et à la croissance de la pomme de terre (*Solanum tuberosum*).

4. Conditions microclimatiques :

Le suivi des facteurs abiotiques est essentiel pour évaluer l'influence de l'environnement sur le développement morpho-physiologique des cultures de tomate (*Solanum lycopersicum*) et de pomme de terre (*Solanum tuberosum*). L'expérimentation s'est déroulée durant la période allant du 11 mars au 8 juillet pour la tomate, et du 21 avril au 28 juin pour la pomme de terre.

Les données météo observées durant les différentes phases du cycle végétatif sont résumées ci-dessous :

➤ **Évolution mensuelle des paramètres météorologiques à Aïn Témouchent :**

Les données météorologiques mensuelles du site expérimental ont été établies sur la base des données de la station météorologique d'Aïn Témouchent (ONM / Climate Data), complétées par nos relevés directs sur le terrain C'est ce que montre le Tableau N°2.

Tableau N°2 : Les Conditions climatiques

Mois Paramètres	Températures	Humidité relative	Précipitations
Mars (Semis de la tomate - 11 mars)	Min 9C° max 18C° moy 13C	Environ 68% à 72%.	35 mm réparties sur environ 8 jours
Avril (Plantation de la pomme de terre - 21 avril)	Min 10C°, max 20°C Moy 15C°.	Environ 65% à 70%.	38mm. Conditions printanières favorables au développement initial des deux cultures.
Mai (Phase de croissance active)	Min 13C°, max 23C°.Moy18C°	Environ 60% à 65%.	En baisse 22mm, marquant le début de la période sèche
Juin (Récolte de la pomme de terre - 28 juin)	Min 17C°, max 27C° Moy 22C°	Environ 55% à 60%.	Faibles 6 mm, nécessitant un apport d'irrigation régulier.
Juillet (Récolte de la tomate - 8 juillet)	Min 20C°, max 30C° Moy25C°	Environ 50% à 55%.	Quasi-nulles 2 mm (qu'il n'y a presque pas eu de pluie durant tout le mois de juillet.)

5. Matériel Végétal et Substrat :

Le matériel végétal de cette étude comprend deux espèces clés de Solanacées, cultivées sur un substrat homogène pour évaluer précisément l'impact de l'extrait de marc de café. Ce dispositif permet de mesurer leurs réponses morpho-physiologiques dans des conditions de développement standardisées

5.1. Espèces étudiées :

Pour évaluer l'effet de l'extrait de marc de café sur la croissance et le développement morpho-physiologique, deux espèces maraîchères majeures de la famille des Solanacées ont été sélectionnées : la tomate (*Solanum lycopersicum*) et la pomme de terre (*Solanum tuberosum*) et la variété utilisée « Rio Grande ».

5.2. Caractéristiques de la culture : La tomate est une plante herbacée annuelle exigeante en lumière et en chaleur. Elle présente un système racinaire fasciculé et très étalé, particulièrement sensible aux propriétés physiques et chimiques du substrat (Figure 10).



Figure 10 : Préparation des jeunes plantules pour le repiquage (yeklef 2026)

6 .Matériel de plantation et calendrier :

Le semis a été réalisé le 11 mars 2026. Les jeunes plants ont été conduits jusqu'à la récolte effectuée le 8 juillet 2026.

7. La Pomme de terre (*Solanum tuberosum*) :

En utilisé deux variétés à chair/peau blanche ont été sélectionnées pour cette étude:

- La variété « Spunta » (caractérisée par des tubercules réguliers de forme oblongue à peau lisse claire).

- **Caractéristiques de la culture :** La pomme de terre est une plante tubéreuse herbacée. Contrairement à la tomate, son organe de réserve (le tubercule) se développe sous terre, ce qui rend le développement de la plante très dépendant des caractéristiques physico-chimiques et de la structure du support de culture (Figure 11).



Figure 11 : Croissance des plants de pomme de terre cultivés en sacs sous serre. (yeklef 2026)

3. Matériel de plantation et calendrier :

La plantation a été réalisée à partir de tubercules de semence le 21 avril 2026. Le suivi de la culture s'est poursuivi jusqu'à la récolte des tubercules le 28 juin 2026.

7.1. Dispositif de culture et support :

- **Contenants de culture :** Les deux cultures ont été conduites dans des sacs de culture individuels disposés de manière homogène sur des tables d'expérimentation hors-sol. Ce système garantit un drainage optimal et un contrôle précis du volume de substrat attribué à chaque plant.

7.2. Substrat de base et amendement :

- **Substrat de base** : Un mélange homogène servant de support témoin (T_0), offrant une bonne porosité et une capacité de rétention d'eau adéquate.
- **Amendement (Marc de café)**: Le marc de café séché et préparé a été incorporé/appliqué selon les différentes concentrations définies dans le protocole expérimental, afin d'évaluer son rôle d'amendement organique et stimulant sur la croissance végétale.

7.3. Préparation du marc de café et des solutions d'arrosage (la solution mère) :

Afin d'évaluer l'effet de l'extrait aqueux de marc de café sur le développement et la croissance des cultures d'étude (tomate et pomme de terre), un protocole d'extraction aqueuse et de dilution quantitative en volumes variables a été mis en œuvre au laboratoire pour préparer six traitements distincts (T_1 à T_6).

- **Origine du produit** : Le marc de café utilisé provient exclusivement de la préparation de café moulu issu de la marque commerciale « Aroma » (100% Arabica obtenu des cafétéria de Noureddine à Tlemcen et cafétéria de El-fathe à Ain Témouchent), récupéré après un processus de filtration.
- **Séchage et stabilisation** : Le marc de café humide a été étalé en couche mince et séché à l'air libre afin d'éliminer l'excès d'humidité, d'empêcher toute prolifération fongique et de garantir la conservation de ses propriétés physico-chimiques.
- **Dosage et macération** : Une masse exacte de 625 g de marc de café séché a été pesée à l'aide d'une balance de précision, puis immergée dans un volume de 5 L d'eau distillée.
- **Extraction** : Le mélange a été porté à ébullition (ou chauffé) à une température de 80 °C dans un bain-marie de laboratoire pendant une durée variant de 30 à 40 minutes, afin de favoriser l'extraction des composés bioactifs hydrosolubles.
- **Filtration** : La suspension liquide a été filtrée à travers un tissu fin puis sur papier filtre de laboratoire afin d'éliminer la totalité des particules solides en suspension et d'obtenir un extrait aqueux pur et limpide (solution mère à 100%) (Figure 12) .



Figure 12 : Phase d'ébullition et d'infusion du marc de café au bain-marie (yeklef 2026)

8. Conduite de la Culture et Protocoles d'Application :

La conduite des cultures a été réalisée selon un protocole rigoureux afin d'assurer un développement optimal des plants sous serre et en plein champ. L'ensemble des interventions, du semis à la plantation, a été harmonisé entre les deux modes de conduite pour garantir la comparabilité des essais

8.1.Plantation et mise en place (en Serre et en Plein Champ) :

La mise en place de l'essai a été réalisée simultanément sous les deux modes de conduite (sous serre et en plein champ) :

- **Pour la tomate :** Le semis a été réalisé le 11 mars 2026. Les jeunes plants ont été repiqués au stade de 3 à 4 vraies feuilles.
- **Pour la pomme de terre :** La plantation a été effectuée le 21 avril 2026 à partir de tubercules de semence placés à une profondeur constante.

8.2. Application des traitements et régime d'irrigation :

Le protocole d'irrigation a été structuré en deux phases distinctes :

a) Phase d'installation (Démarrage) : Durant la première phase de croissance et d'enracinement, l'irrigation a été effectuée à l'eau ordinaire (eau claire) selon un rythme d'un

jour sur deux (tous les deux jours), afin d'assurer la reprise optimale des plants en serre comme en plein champ.

b) Phase d'application des traitements (Après développement des plants) : Une fois les plants bien développés, l'application des traitements à base d'extrait aqueux de marc de café a été démarrée.

- **Fréquence et durée :** L'application des traitements s'est déroulée de manière quotidienne (une fois par jour) sur une période continue de trois (03) semaines.
- **Préparation des dilutions :** Les différentes concentrations ont été préparées extemporanément chaque jour avant l'arrosage, en mélangeant la solution mère pure avec de l'eau distillée dans des récipients gradués selon la répartition figurant dans le tableau ci-dessous (en plein champ) Et (Sous serre) : C'est ce que montre le Tableau N°3 et N°4 :

Tableau N°3 : Répartition quotidienne des volumes de la solution mère et d'eau distillée selon les traitements (Volume total = 1650 ml / bloc). (en plein champ)

Traitement / Bloc	Concentration	Volume de la solution mère prélevé (mL)	Volume d'eau distillée ajouté (ml)	Volume final d'arrosage (l)
1	0 %	0 ml	0 ml	0 ml
2	5%	330 ml	1320 ml	1650ml
3	10 %	660 ml	990 ml	1650ml
4	15 %	990 ml	660 ml	1650ml
5	20 %	1320 ml	330 ml	1650ml
6	25 %	1650 ml	0 ml	1650ml

Tableau N°4: Répartition quotidienne des volumes de la solution mère et d'eau distillée selon les traitements (Volume total 200 ml /sac) Sous serre

Traitement / Sac	Concentration	Volume de la solution mère prélevé (mL)	Volume d'eau distillée ajouté (ml)	Volume final d'arrosage (l)
1	0 %	0 ml	0 ml	0 ml
2	5%	10 ml	190 ml	200 ml
3	10 %	20 ml	180 ml	200 ml
4	15 %	30 ml	170 ml	200 ml
5	20 %	40 ml	160 ml	200 ml
6	25 %	50 ml	150 ml	200 ml

10 . Entretien des cultures (en Serre et en Plein Champ) :

Pour déterminer la réponse physiologique et morphologique des plantes de pomme de terre (*Solanum tuberosum*) et de tomate (*Solanum lycopersicum*) sous l'effet d'un traitement à base d'intrants organiques liquides extraits de marc de café, un protocole de suivi régulier a été mis en place sous serre. Cette phase vise à évaluer les indicateurs de croissance végétative, ainsi que le niveau de réponse ou de stress induit par la fréquence d'irrigation aux concentrations spécifiées (solution mère ou solution diluée) sur une période expérimentale de 3 semaines

Afin de garantir la précision des résultats et d'assurer des conditions de croissance optimales durant cette période, les mesures de gestion et d'entretien suivantes ont été rigoureusement appliquées :

- **Maintien de l'état hydrique** : Une attention particulière a été portée au suivi de l'humidité du substrat en plein champ pour compenser l'évaporation due au vent et au rayonnement direct, comparativement au milieu sous serre.
- **Désherbage** : Un désherbage manuel systématique a été réalisé régulièrement dans et autour des sacs de culture pour éliminer toute compétition adventice.
- **Suivi phytosanitaire** : Une inspection visuelle quotidienne de la surface foliaire et des tiges a été menée sur l'ensemble des plants pour détecter toute apparition de ravageurs ou de symptômes de maladies.

Chapitre 04: Résultats et discussion

Dans cette section, nous présentons l'ensemble des résultats obtenus lors de l'expérimentation visant à étudier l'effet de l'incorporation de différentes doses de marc de café sur la croissance et la morphologie des plants de tomate. L'analyse porte principalement sur la variation des paramètres de développement (hauteur, nombre de feuilles, aspect général) en comparaison avec les plants témoins.

1.L'effet du marc de café sur la croissance des plants de tomate et pommes de terre :

Afin d'évaluer l'effet de l'application de différentes concentrations de marc de café sur la croissance des plants de tomates cultivés en serre ainsi que sur les tubercules de pomme de terre, nous avons suivi plusieurs paramètres morphologiques, notamment la hauteur des plants, le nombre de feuilles ainsi que leur aspect général.

Le tableau N°5 présente un suivi des paramètres de croissance et de l'aspect morphologique de plantes de tomates

Tableau N°5 : les Tomates (en Serre) - Suivi de l'arrosage au marc de café

Semaine	Concentration/ témoin	Hauteur cm	Nombre de feuilles	Observation
Semaine 1	0 %	20 cm	14 feuilles	Bonne vigueur, port compact et sain, feuilles bien vertes.
	5 %	18 cm	8 feuilles	Aspect satisfaisant, proche du témoin, bonne turgescence.
	10 %	24 cm	8 feuilles	Meilleur développement apparent : tige vigoureuse, bonne biomasse foliaire, effet biostimulant modéré visible.
	15 %	30 cm	9 feuilles	Bon développement, comparable ou légèrement supérieur au témoin.
	20 %	24 cm	10 feuilles	Développement acceptable, avec début d'hétérogénéité légère ou d'allongement inter-nodal.
	25 %	32 cm	15 feuilles	Début de ralentissement de croissance ou stress léger (feuilles un peu plus pâles)

La concentration optimale du produit se situe entre 10% et 15%, là où l'effet biostimulant sur la croissance en hauteur est le plus bénéfique sans nuire à la santé globale de la plante. Dépasser 20% semble entraîner un effet de surdosage ou de toxicité.

Voici (la figure 13)des tomates Après 1 semaine de l'arrosage au marc de café :



Figure 13 : Croissance des plants de tomate après la première semaine d'irrigation par l'extrait de marc de café (yeklef 2026)

Semaine 2	0 %	29 Cm	18 feuilles réparties sur les branches.	Excellente croissance végétative avec une couleur verte vive et saine. Présence de deux tiges principales (forte ramification). Aucune présence de fruits visibles pour le moment ; l'énergie est concentrée sur la croissance foliaire.
	5 %	22 Cm	10feuilles actives.	Croissance droite et harmonieuse avec une seule tige principale. Légère présence de feuilles inférieures flétries ou desséchées. La partie supérieure est propre et en bonne santé ; pas encore de fruits visibles.
	10 %	28 Cm	9 feuilles.	Développement végétatif fort et bien équilibré. Début de fructification : Deux fruits verts de taille moyenne

				sont nettement visibles. Feuilles bien vertes et en bon état général avec une bonne ramification.
	15 %	34 Cm	11 feuilles.	Fructification précoce/marquée : Présence d'un fruit vert à la base. Stress foliaire visible : Les feuilles inférieures et médianes sont enroulées et flétries, traduisant un début de stress hydrique/salin.
	20 %	28 Cm	13 feuilles	Croissance verticale de l'apex maintenue. Signes de stress : Enroulement prononcé et courbure des feuilles (inférieures et médianes) avec un début de nécrose/dessèchement marginal, traduisant un stress osmotique/salin plus accusé. Fructification : Présence d'un fruit vert bien formé.
	25 %	35 Cm	18 feuilles	Bon développement végétatif au niveau de l'apex (sommet). Présence d'un fruit vert de bonne taille sur le côté gauche. Jaunissement et chute marqués des feuilles inférieures proches du sol en raison de l'augmentation de la concentration.

Ces observations montrent un effet dose-dépendant : si les concentrations élevées (15 % à 25 %) apportent suffisamment de nutriments pour soutenir la croissance de la tige apex et le développement des fruits, elles génèrent simultanément une contrainte osmotique et un stress phytotoxique sur le feuillage basal.

Voici la figure des tomates Après 2 semaine de l'irrigation au Marc de café (Figure 14)



Figure 14 :Croissance des plants de tomate au milieu de l'expérimentation (yeklef 2026)

Semaine 3	0 %	37 Cm	13 Feuilles jaunies	Croissance haute, chlorose générale marquée avec dessèchement des feuilles basales. Absence de fruits.
	5 %	26 Cm	8 Feuilles vertes	Plante relativement courte, feuillage apical vert foncé et sain. Nécrose légère sur une feuille basse, pas de fruits.
	10 %	32 Cm	4 Feuilles fannées	Chute et dessèchement de la majorité des feuilles. Présence de deux petits Tomates rouges à mi-hauteur
	15 %	38 Cm	9 Feuilles actives	Bon développement végétatif supérieur, présence d'un Tomate rouge de taille moyenne. Feuilles médianes partiellement séchées.
	20 %	34 Cm	8 Feuilles fannées	Flétrissement et jaunissement sévères de l'appareil végétatif. Présence d'un Tomate rouge avec dessèchement de l'apex.
	25 %	39 Cm	15 Feuilles fannées	Feuillage très réduit et desséché. Présence d'un Tomate rouge nettement plus volumineux comparativement aux autres lots.

Après 3 semaines, la dose à 15 % offre le meilleur équilibre avec un bon développement végétatif supérieur et la présence d'une tomate de taille moyenne. À l'inverse, les faibles concentrations (5 %) réduisent fortement la hauteur, tandis que la concentration à 10 % provoque une chute marquée des feuilles malgré la fructification. Enfin, les fortes doses (20 %

et 25 %) entraînent un flétrissement et un dessèchement sévères de l'appareil végétatif, révélant un effet phytotoxique sur le feuillage.

Voici (la figure 15) des tomates a la fin d'irrigation avec l'eau et marc de café :

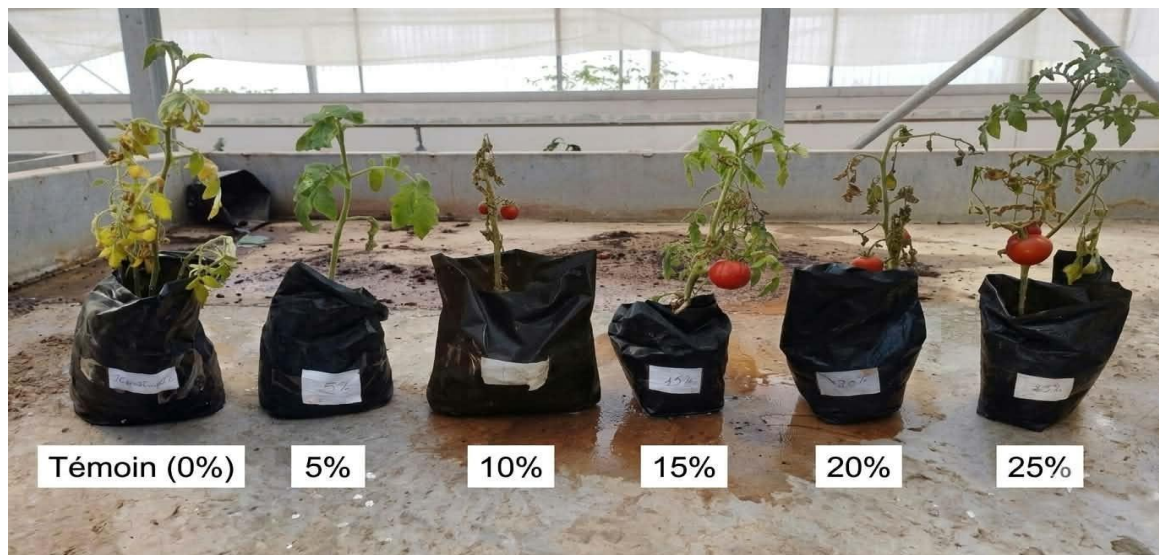


Figure 15 :État des plants de tomate à la fin de la période d'expérimentation (yeklef 2026)

Ce tableau N°6 présente un suivi des paramètres de croissance et de l'aspect morphologique de la pommes de terre.

Tableau N°6 : Suivi de l'arrosage au marc de café de la pommes de terre (en Serre)

Semaine	Concentration/ témoin		Hauteur cm	Nombre de feuilles	Observation
Semaine 1	0 %		20 cm	14 feuille dense	Excellente croissance végétative, feuilles larges, vert foncé et vigoureux (plante témoin de référence).
	5 %		10 cm	12 feuilles Bonne	Bonne croissance proche du

					témoin, avec un tout léger début de réduction de la taille de certaines feuilles inférieures.
	10 %		18 cm	11 feuilles Moyenne	Ralentissement marqué de l'élongation, début de stress ou légère courbure des feuilles supérieures.
	15 %		16 cm	9 feuilles Faible	Nanisme relatif de la tige, léger jaunissement possible des feuilles anciennes.
	20 %		11 cm	7 feuilles Faible	Stress clair, arrêt relatif de la croissance en longueur, réduction de la surface foliaire.
	25 %		18 cm	6 feuilles Très faible	Toxicité évidente ou stress sévère, nanisme et appareil végétatif pâli.

Les résultats montrent une relation inversement proportionnelle entre la concentration en marc de café et le développement végétatif de la pomme de terre après une semaine d'irrigation. Si la faible concentration (5 %) conserve un développement proche du témoin, l'augmentation des doses (10 % à 25 %) engendre progressivement un ralentissement de l'élongation, une diminution du nombre de feuilles et l'apparition de signes de toxicité phytotoxique ou de stress (jaunissement, nanisme).

Résultat après une semaine d'arrosage des plants de pommes de terre avec du marc de café à différents concentration (Figure 16)



Figure 16 : Croissance des plants de pomme de terre après la première semaine d'irrigation de marc de café (yeklef 2026)

Semaine 2	0 %	28 cm	24 Feuilles	Plante vigoureuse, bon développement foliaire, couleur verte saine, port dressé sans stress apparent.
	5 %	12 cm	16 Feuilles	Croissance fortement réduite (nanisme relatif), système foliaire chétif, possible effet de

				phytotoxicité initiale ou mauvaise assimilation.
	10 %	25 cm	18 Feuilles	Excellente vigueur, meilleure réponse de croissance aérienne, feuilles larges et bien expansées (effet stimulant optimal).
	15 %	20 cm	16 Feuilles	Croissance satisfaisante mais légèrement inférieure au 10%, port équilibré, pigmentation normale.
	20 %	18 cm	14 Feuilles	Début de fatiguer ou affaiblissement de la tige, présence tuteur, port un peu lâche.
	25 %	16 cm	12 Feuilles	Symptômes de stress potentiels (excès de matière organique/phytotoxicité locale), entre-nœuds un peu courts ou affaissement partiel.

Les résultats montrent un effet stimulant optimal du marc de café à une concentration de 10 % (hauteur maximale de 25 cm et 18 feuilles). En revanche, des concentrations plus faibles (5 %) ou excessives (≥ 20 %) entraînent une inhibition de la croissance, voire des symptômes de phytotoxicité et d'affaiblissement.

Résultat après Deux semaine d'arrosage des plants de pommes de terre avec du marc de café à différents (Figure 17)



Figure 17: Croissance des plants de pomme de terre après la deuxième semaine (yeklef 2026)

Semaine 3	0 %	30 cm	23 Feuilles	Plante vigoureuse, bonne turgescence, coloration verte intense, appareil végétatif sain et bien ramifié.
	5 %	17 cm	20 Feuilles	Bonne croissance, léger ralentissement ou aspect similaire au témoin avec une légère variation de turgescence.
	10 %	23 cm	16 Feuilles	Croissance optimale apparente, présence de bourgeons floraux/inflorescences,

				bonne adaptation à cette dose.
	15 %	17 cm	8 Feuilles Jaunissantes	Début de chlorose et jaunissement foliaire, stress phytotoxique modéré, affaissement de la tige.
	20 %	15 cm	6 Feuilles Début nécrose	nécrose avancée, flétrissement sévère, feuilles desséchées et décolorées (toxique).
	25 %	16 cm	0 Nécrose totale	Nécrose totale, mort de la plante (phytotoxicité aiguë liée à la concentration excessive en polyphénols/caféine ou acidité).

Les résultats montrent une nette inhibition de la croissance végétale à mesure que la concentration en marc de café augmente, passant d'un développement optimal à 0 % (30 cm, 23 feuilles) à une réduction significative de la taille et du feuillage dès 5 % et 15 %. Au-delà de cette limite (20 % à 25 %), un effet phytotoxique sévère apparaît, provoquant une chlorose avancée puis la nécrose totale et la mort de la plante.

Résultat après Trois semaine d'arrosage des plants de pommes de terre avec du marc de café à différents (Figure 18)



Figure 18: les plants de pomme de terre après la troisième semaine (yeklef 2026)

Le tableau ci-dessous représentent le protocole de suivi temporel (en plein champ) des traitements d'irrigation par l'extrait liquide de marc de café (à différentes concentrations et solution mère) sur une période de 3 semaines, pour la pomme de terre (*Solanum tuberosum*) . Ce suivi périodique vise à mesurer les indicateurs morphologiques et physiologiques et à observer tout signe de réponse ou de stress végétal

Tableaux 07 : Suivi de l'arrosage au marc de café de la pommes de terre (Plein champ)

Semaine	Concentration/ témoin	Hauteur cm	Nombre de feuilles	Observation
Semaine 1	0 %	30-40 cm	45-57 feuilles	Bonne croissance végétative, feuilles vives et dressées, aucun signe apparent de stress ou de flétrissement.
	5 %	25-35 cm	35-48 feuilles	Plantes présentes mais montrant

				quelques signes de recul ou de flétrissement partiel sur certaines parties par rapport au témoin.
	10 %	20-30 cm	25-38 feuilles	Baisse nette de la masse végétative, présence de sécheresse et de flétrissement sévère sur les plantes de cette ligne.
	15 %	15-25 cm	18-28 feuilles	Reprise relative de la croissance végétative par rapport à 10%, plantes semblant mieux tolérantes ou clairsemées avec une vitalité acceptable.
	20 %	12-18 cm	12-25 feuilles	Amélioration de la densité et de la vitalité des feuilles par rapport aux concentrations plus critiques

	25 %	8-14 cm	5-20 feuilles	Plantes paraissant compactes et bien vertes, sans signes évidents de toxicité aiguë visibles à l'œil nu.
--	------	---------	---------------	--

Les résultats indiquent clairement qu'un apport direct de marc de café non composté à des doses de 20 % ou 25 % est néfaste au développement végétatif de la pomme de terre après une semaine.

Voici (la figure19) des pommes de terre Après 1 semaine de l'arrosage au marc de café :



Figure 19: Croissance des plants de pomme de terre en plein champ après la première semaine
(yeklef 2026)

Semaine 2	0 %	15-20 cm	15-20 feuilles	Stress évident, étalement ou couchage des branches sur le sol, léger jaunissement avec flétrissement partiel des sommets.
	5 %	25-28 cm	30-38 feuilles	Meilleure croissance végétative, bonnes ramifications, un certain dessèchement au milieu ou sur les feuilles inférieures, mais plantes plus vigoureuses et relativement dressées.
	10 %	10-18 cm	18-20 feuilles	Baisse claire de la taille, flétrissement et détérioration de certaines plantes ; les plantes paraissent plus courtes et plus faibles

	15 %	15-25 cm	20-30 feuilles	Reprise relative de l'activité végétative, feuilles vertes régulières, croissance dressée
	20 %	10-15 cm	22-35 feuilles	Croissance végétative homogène, feuilles d'un bon vert, excellente ramification et port régulier.
	25 %	8-15 cm	25-32 feuilles	Croissance dressée et stable, feuilles en bon état de santé et absence de signes manifestes de toxicité aiguë.

Les résultats montrent une réponse dose-dépendante du marc de café, où la concentration optimale à 5 % favorise la meilleure croissance végétative (25-28 cm) et le meilleur développement foliaire (30-38 feuilles). À l'inverse, l'augmentation progressive de la concentration jusqu'à 20-25 % entraîne une inhibition nette de la croissance en hauteur (réduite à 8-15 cm), probablement liée à des effets phytotoxiques ou un excès de matière organique.

Résultat après Deux semaine d'arrosage des plants de pommes de terre avec du marc de café à différents (Figure 20).



Figure 20 : Croissance des plants de pomme de terre en plein champ après la deuxième semaine (yeklef 2026)

Semaine 3	0 %	20-25 Cm	20-25 feuilles	Début de chlorose / sénescence légère sur la feuille basale gauche. ramification basale correcte Croissance végétative plus compacte et réduite.
------------------	-----	----------	----------------	--

				Bonne coloration verte et vitalité acceptable, sans signes majeurs De stress apparents.
	5 %	12_22 Cm	25_30 Feuilles	Croissance végétal acceptable, port dressé avec une légère chlorose foliaire Plant plus jeune ou réduit, présentant une bonne vitalité chlorophyllienne
	10 %	6_15 Cm	15_18 Feuilles	Léger incurvation ou enroulement de quelques feuilles basales. / Légère courbure ou tortillage de certaines feuilles situées à la base. Apparition d'une sénescence/dessèchement partiel ou d'un nanisme
	15 %	7-15 Cm	8-15 Feuilles	Des Plantes fortement endommagée, avec dessèchement Plante relativement saine, dotée d'un feuillage vert abondant
	20 %	10-17 Cm	15-20 Feuilles	Certaines feuilles semblent orientées vers le haut et ouvertes, tandis que de légères ondulations ou un léger stress apparaissent sur les

				feuilles inférieures de la plante.
	25 %	5-25 Cm	4-15 Feuilles	La petite plante Flétrissement total et effondrement complet de l'appareil végétatif. Changement de couleur des feuilles du jaune pâle L'autre plante Dominance de la couleur verte et bonne vitalité de l'appareil végétatif. Régularité et déploiement des feuilles composées avec une densité acceptable. Jaunissement léger

L'utilisation du marc de café en irrigation présente un effet dépendant de la dose (dose-dépendant). À faible concentration (5 %), il stimule le développement foliaire. En revanche, au-delà de 10 %, il inhibe la croissance végétative, pour devenir phytotoxique à 25 % (flétrissement et sénescence précoce). La concentration optimale parmi les modalités testées se situe autour de 5 %.

Résultat après Trois semaine d'arrosage des plants de pommes de terre avec du marc de café à différents Concentration . (Figure 21)



Figure 21: les plantes de pommes de terre (0% 5%10%15%20%25%) (yeklef 2026)

Le tableau ci-dessous représentent le protocole de suivi temporel (en plein champ) des traitements d'irrigation par l'extrait liquide de marc de café (à différentes concentrations et solution mère) sur une période de 3 semaines, pour la tomate (*Solanum lycopersicum*). Ce suivi périodique vise à mesurer les indicateurs morphologiques et physiologiques et à observer tout signe de réponse ou de stress végétal

Tableaux 08 : Suivi de l'arrosage au marc de café sur les Tomates (Plein champ)

Semaine	Concentration/ témoin	Hauteur cm	Nombre de feuilles	Observation
Semaine 1	0 %	19-25 Cm	20-40 feuilles	Bon état Présence de ramifications
	5 %	5-12 Cm	7-28 feuilles	Croissance normale et verdissement, tandis que l'autre plante est encore en phase de croissance et d'élongation.
	10 %	10-33 Cm	4-15 feuilles	Petite plante, l'autre est à un stade intermédiaire mais en bon état.
	15 %	15-20 Cm	5-10 feuilles	Petites plants en phase de croissance Bon état

	20 %	20-40 Cm	20-38 feuilles	Croissance hétérogène, bonne coloration verte et bon état général
	25 %	25-42 Cm	34-40 feuilles	Croissance ramifiée, bonne coloration verte et hauteur adéquate

la première semaine, l'augmentation du pourcentage de marc de café montre un impact positif global sur le développement végétatif, favorisant une croissance en hauteur plus importante (jusqu'à 25–42 cm à 25 %) et un nombre élevé de feuilles (jusqu'à 34–40 feuilles). Bien que les concentrations plus faibles (5 % à 15 %) présentent une croissance plus modérée mais régulière et un bon état général des plants, la dose à 25 % semble stimuler le plus fortement l'élongation et le feuillage.

Résultat après 1 semaine d'arrosage des plants de Tomates avec la marc de café à différents Concentration. (Figure 22)



Figure 22: Croissance et développement des plants de tomate en plein champ durant la première semaine

Semaine 2	0 %	30-45 Cm	22-43 Feuilles	bonne croissance comparable au témoin, réponse nutritionnelle positive et stable. Présence des petits en phase de germination sur Les tomate.
	5 %	10-38 Cm	10-32 Feuilles	Croissance notable mais faible par rapport à la première semaine, et Présence des fruits D'un seul plant de tomate.
	10 %	20-40 Cm	10-15 Feuilles	Croissance végétative bonne et de densité moyenne, feuilles de couleur verte normale et exemptes de symptômes de maladie. Apparition des boutons floraux de tomate sur un seul pied. »
	15 %	22-31 Cm	12-18 Feuilles	Les plants de tomates sont encore en croissance et il n'y a pas encore des fruits.
	20 %	27-44 Cm	33-45 Feuilles	Les plantes présentent une croissance végétative bonne et acceptable, avec des

				ramifications bien distinctes et une bonne expansion du système foliaire, en présence des petits fruits et des limaces sur les feuilles."
	25 %	37-49 Cm	42-56 Feuilles	Les plantes présentent un bon développement végétatif, modéré à relativement dense sur certaines lignes, avec des ramifications basales bien visibles et des feuilles composées d'un vert naturel, sans jaunissement. Présence des petits fruits

Après deux semaines d'irrigation, la croissance de la tomate augmente proportionnellement avec la concentration de marc de café, le témoin (0\%) atteignant 30–45 cm (22–43 feuilles) tandis que les concentrations plus élevées (20\% et 25\%) stimulent un développement végétatif supérieur allant de 27 à 49 cm de hauteur et jusqu'à 56 feuilles. Cette amélioration progressive du développement végétatif et de la foliation témoigne d'un apport nutritionnel bénéfique du marc de café aux doses élevées

Résultat après 2 semaine d'arrosage des plants de Tomates avec la marc de café à différents Concentration. (Figure 23) (Figure 24)



Figure 23 :Stade d'initiation de la floraison et de la nouaison des plants de tomate en plein champ durant la deuxième semaine (yeklef 2026)



Figure 24 : des limaces accroché à un plant de tomate (yeklef 2026)

Semaine 3	0 %	30-52 Cm	30-48 Feuilles	bonne dispersion et ramifications larges, mais les tiges semblent étalées ou légèrement retombantes sur le sol. Bonne fructification avec un nombre remarquable de fruits mûrs de couleur rouge et d'autres verts.
	5 %	12-41 Cm	18-39 Feuilles	nette variation ; petite plante en phase de

				croissance et l'autre dense et relativement érigée, apparition de fruits rouges de taille moyenne et de bonne taille sur les plantes denses.
	10 %	22-43 Cm	13-20 Feuilles	plante principale de densité moyenne et érigée, avec l'apparition de tomates vertes de taille moyenne.
	15 %	27-38 Cm	19-25 Feuilles	augmentation de la croissance à faible taux avec absence de fruits de tomate
	20 %	32-51 Cm	37-49 Feuilles	Plante principale à densité croissante, très bonne fructification avec des fruits rouges mûrs sur une plante, et d'autres verts sur

				la deuxième plante en cours de développement
	25 %	42-55 Cm	45-59 Feuilles	Croissance végétative intense, forte et érigée (à gauche), à côté d'une plante en régression ou très fructifère mais présentant une surmaturation des branches (à droite), avec des fruits rouges abondants et proéminents, et des fruits verts sains sur l'autre plante

Les résultats montrent une corrélation directe et positive entre la concentration en marc de café et le développement végétatif des plants de tomates après 3 semaines. En passant d'une concentration de 5 % à 25 %, la hauteur des tiges progresse de 12–41 cm à 42–55 cm et le nombre de feuilles augmente significativement de 18–39 à 45–59, s'accompagnant d'une croissance végétative intense et d'une fructification abondante.

Résultat après 3 semaine d'arrosage des plants de Tomates avec la marc de café à différents Concentration. (Figure 25)



Figure25: les plantes de tomates (0% 5% 10% 15% 20% 25%) (yeklef 2026)

2. Discussion et Interprétation des Résultats

Cette section vise à discuter et interpréter les résultats de l'étude sur l'effet de différentes concentrations sur la croissance de la tomate et de la pomme de terre sous serre Et en pleine champ .

2.1. Effet du marc de café sur la tomate (*Solanum lycopersicum*)

a) Sous serre :

La figure ci-dessus illustre la variation du développement végétatif et de la fructification des plants de tomate cultivés en sachets plastiques sous serre, en fonction des différentes concentrations d'extrait de marc de café :

Témoin (0%) : Développement végétatif dense et hauteur importante du plant, accompagnés d'un jaunissement partiel des feuilles basales lié à la compétition nutritionnelle, sans présence de fruits mûrs .

Concentration 5% : Croissance végétative moyenne et stable avec une tige bien développée, ne présentant aucun signe de chlorose ou de phytotoxicité.

Concentration 10% : Réduction marquée de l'appareil foliaire avec dessèchement des feuilles et présence d'un très petit fruit, traduisant un effet de stress chimique et une phytotoxicité précoce.

Concentration 15% : Développement végétatif moyen caractérisé par la formation d'un fruit rouge bien mûr de taille moyenne, indiquant une stimulation de la fructification précoce.

Concentration 20% : Faible densité foliaire avec flétrissement et chlorose observés sur les feuilles, accompagnés de la présence d'un petit fruit mûr.

Concentration 25% : Bon développement en hauteur du plant avec un feuillage vert et présence d'un fruit rouge mûr de taille moyenne, montrant une certaine tolérance du plant à cette concentration sous serre. (Figure 26)

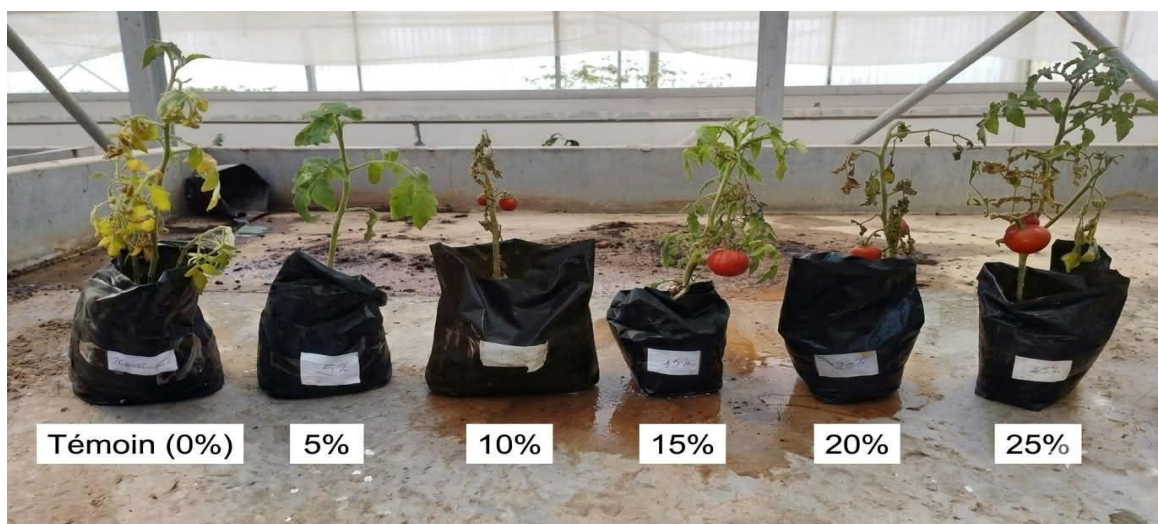


Figure 26 : Effet global des concentrations de marc de café sur la croissance végétative et la fructification des plants de tomate sous serre. (yeklef 2026)

b) en plein champ :

Les figures illustrent l'effet de l'extrait de marc de café sur le rendement et le calibre des fruits de tomate récoltés en plein champ :

Témoin (0%) : Obtention d'une production satisfaisante (environ 9 fruits) avec des calibres variables (moyens à grands) et un aspect sain. (Figure 27)



Figure 27 : Rendement en fruits de tomate pour le témoin (0%) (yeklef 2026)

Concentration 5% : Récolte de 4 fruits de calibre moyen et homogène, témoignant d'un développement normal de la plante sans signes de phytotoxicité.(Figure 28)



Figure 28 :Rendement en fruits de tomate à la concentration (5%) (yeklef 2026)

Concentration 10% : Production du nombre le plus élevé de fruits (7 fruits) de tailles moyennes à petites, présentant une bonne maturité. (Figure 29)



Figure 29: Rendement en fruits de tomate à la concentration (10%) (yeklef 2026)

Concentration 15% : Absence de récolte : Aucune production de fruits n'a été enregistrée à cette concentration en raison du retard de croissance et du faible développement initial des plants, empêchant la fructification.

Concentration 20% : Production de 4 fruits de bon calibre, avec l'apparition de légères malformations et une maturité hétérogène comparativement au témoin. (Figure 30)



Figure 30: Rendement en fruits de tomate à la concentration (20%) (yeklef 2026)

Concentration 25% : Obtention de 6 fruits de calibre moyen à petit, montrant le maintien de la fructification en plein champ malgré l'effet inhibiteur potentiel des fortes concentrations sur l'appareil végétatif. (Figure 31) (yeklef 2026)



Figure 31 : Rendement en fruits de tomate à la concentration 25% (yeklef 2026)

2.2.Effet du marc de café sur la pomme de terre (*Solanum tuberosum*)

a) sous serre :

Les résultats dans ces figures illustrés montrent une réponse différentielle de la pomme de terre et de la tubérisation en fonction de la concentration en extrait de marc de café :

Témoin (0%) : Production satisfaisante de tubercules (4 tubercules de taille moyenne à bonne) présentant un aspect sain. (Figure 32)



Figure 32: Tubercules de pomme de terre récoltés à la concentration (0%) (yeklef 2026)

Concentration 5% : Rendement en tubercules comparable au témoin (4 tubercules), témoignant d'une bonne tolérance de la plante à cette dose sans signes de phytotoxicité .(Figure 33)



Figure 33 : Tubercules de pomme de terre récoltés à la concentration (5%) (yeklef 2026)

Concentration 10% : Obtention de 3 tubercules de calibre bien développé et homogène, ce qui indique un maintien régulier du processus de tubérisation. (Figure 34)



Figure 34 : Tubercules de pomme de terre récoltés à la concentration 10% (yeklef 2026)

Concentration 15% : Formation de 3 tubercules de taille moyenne, avec l'apparition de légères altérations superficielles sur l'épiderme dues à la concentration de l'extrait. (Figure 35)



Figure35 : Tubercules de pomme de terre récoltés à la concentration 15% (yeklef 2026)

Concentration 20% :

Phytotoxicité aiguë : Dessèchement complet et nécrose totale de l'appareil aérien (tiges et feuilles).

Impact sur la tubérisation : La mort précoce de l'appareil végétatif a stoppé la photosynthèse, entraînant l'arrêt de la croissance des tubercules qui restent très atrophiés (2 petits tubercules) (Figure 36)



Figure 36 : Effet de phytotoxicité aiguë et tubercules atrophiés à la concentration 20% (yeklef 2026)

la concentration de 25% :

Effet sur l'appareil aérien : Les résultats montrent une phytotoxicité aiguë marquée, entraînant le flétrissement complet, le dessèchement total et la nécrose intégrale des tiges et du feuillage dans le sac de culture.

Effet sur la tubérisation : La mort précoce de l'appareil végétatif a provoqué l'arrêt immédiat de la photosynthèse et du transfert des assimilats vers les organes de réserve. Ce phénomène a sévèrement inhibé le processus de tubérisation, se traduisant par la récolte de seulement deux très petits tubercules atrophiés dont le développement a été complètement bloqué. (Figure 37)



Figure 37 : Dessèchement, nécrose totale de l'appareil végétatif et tubercules atrophiés à la concentration (25%) (yeklef 2026)

b)en plein champ:

Les figures ci-dessus illustrent l'effet des différentes concentrations d'extrait de marc de café sur le rendement et le développement des tubercules en conditions :

Témoin (0%) : Obtention de 3 tubercules de bonne taille, homogènes et d'aspect sain. (Figure 38)



Figure 38 : Tubercules de pomme de terre récoltés pour le témoin (0%) (yeklef 2026)

Concentration 5% : Augmentation du nombre de tubercules (5 tubercules avec présence d'une petite bille supplémentaire), traduisant un effet stimulateur de la faible concentration sur la tubérisation sans aucun signe de phytotoxicité. (Figure 39)



Figure 39: Tubercules de pomme de terre récoltés à la concentration (5%) (yeklef 2026)

Concentration 10% : Production d'environ 5 tubercules de calibres variables (moyens à petits), indiquant le maintien du processus de tubérisation mais avec une légère réduction du calibre individuel. (Figure 40)



Figure 40 : Tubercules de pomme de terre récoltés à la concentration (10%) (yeklef 2026)

Concentration 15% : Réduction du nombre de tubercules à 3 unités de taille moyenne, marquant le début de l'effet inhibiteur de l'extrait sur la croissance générale. (Figure 41)



Figure 41: Tubercules de pomme de terre récoltés à la concentration (15%) (yeklef 2026)

Concentration 20% : Formation d'un nombre élevé de tubercules mais de très petit calibre et atrophiés, ce qui traduit un stress chimique réduisant le grossissement des tubercules. (Figure 42)



Figure 42: Tubercules de pomme de terre récoltés à la concentration (20%) (yeklef 2026)

Concentration 25% : Chute drastique du rendement avec seulement 2 à 3 très petits tubercules atrophiés. Cela confirme la phytotoxicité aiguë de cette forte concentration, ayant bloqué la photosynthèse et stoppé le développement des tubercules (Figure 43)



Figure 43: Tubercules de pomme de terre récoltés à la concentration (25%) (yeklef 2026)

3. Discussion générale:

Les résultats obtenus mettent en évidence une variation claire de la réponse morphologique et physiologique des deux espèces étudiées, la tomate (*Solanum lycopersicum*) et la pomme de terre (*Solanum tuberosum*), sous l'effet de l'irrigation par l'extrait de marc de café (Marc de café). Cette réponse dépend directement de la concentration de l'extrait, du mode de culture (sous serre vs plein champ) et de la sensibilité propre à chaque espèce.

a) Effet biostimulant aux faibles et moyennes concentrations (5% - 10%) :

L'amélioration significative de la croissance végétative (augmentation de la hauteur de la tige et du nombre de feuilles) ainsi que l'accélération de la fructification chez la tomate aux concentrations de 5% et 10% s'expliquent par la richesse naturelle du marc de café en éléments nutritifs essentiels, notamment l'azote, le potassium (K) et le phosphore (P), en plus de sa matière organique assimilable.

Ces éléments contribuent à :

- **Stimuler l'activité photosynthétique :** en fournissant l'azote indispensable à la synthèse de la chlorophylle et des protéines structurales.
- **Réguler l'équilibre hydrique et enzymatique :** grâce au potassium qui joue un rôle clé dans l'ouverture et la fermeture des stomates ainsi que dans la régulation de la pression osmotique.

- **Accélérer la phase de transition florale et de maturation** : la stimulation nutritionnelle à 10% a accéléré le mûrissement des fruits de tomate tout en augmentant leur calibre, ce qui rejoint les travaux confirmant le rôle de la matière organique diluée dans l'amélioration de la fertilité du sol et l'activation de la microflore bénéfique de la rhizosphère.

b) Phytotoxicité et stress osmotique aux fortes concentrations (15% - 25%) :

À l'inverse, l'application des fortes concentrations (15% à 25%) a provoqué des symptômes aigus de phytotoxicité, caractérisés par le chlorose, la nécrose foliaire, allant jusqu'à la mort complète des plants (notamment chez la pomme de terre à 25% sous serre dès la troisième semaine).

Ce phénomène s'explique par les mécanismes suivants :

- **Effet inhibiteur des métabolites secondaires** : le marc de café non composté contient des teneurs élevées en caféine, en acides phénoliques et en tanins. Ces composés agissent comme des agents allélopathiques inhibant la division mitotique dans les méristèmes racinaires, réduisant ainsi la capacité du système racinaire à absorber l'eau et les minéraux.
- **Stress osmotique et acidification du milieu** : la forte concentration de l'extrait augmente la salinité et l'acidité de la solution du sol, générant un stress osmotique qui empêche l'absorption de l'eau (sécheresse physiologique). Cela explique le dessèchement et la nécrose basale des feuilles inférieures.
- **Influence du mode de culture (Sous serre vs Plein champ) :**

1. Sous serre : le système fermé en pots et la forte évapotranspiration ont entraîné une accumulation des composés phénoliques et des sels toxiques au niveau de la rhizosphère sans possibilité de lessivage, accélérant l'apparition de la toxicité et le dépérissement des plantes.

2. En plein champ : les plantes ont montré une meilleure tolérance (jusqu'à 25%), ce qui est attribué à la capacité de drainage naturel du sol, au lessivage des toxines par les eaux d'irrigation ou de pluie, ainsi qu'à une activité microbienne plus intense capable de biodégrader la caféine et les polyphénols en composés moins toxiques.

c). Différence de sensibilité entre la tomate et la pomme de terre :

La pomme de terre s'est avérée nettement plus sensible au stress phytotoxique que la tomate. Cette sensibilité s'explique par la structure de son système racinaire et de ses tubercules, très

réactifs aux variations osmotiques et à l'acidité du milieu, entraînant l'asphyxie racinaire et l'arrêt de croissance. En revanche, la tomate a fait preuve d'une plus grande plasticité en préservant son méristème apical et le développement des fruits malgré le chlorose et la nécrose des feuilles basales.

4. Comparaison des résultats avec les études et travaux antérieurs :

Les résultats obtenus dans la présente étude s'accordent étroitement avec la littérature scientifique et les travaux antérieurs portant sur l'utilisation du marc de café comme biostimulant ou amendement organique dans le domaine agricole.

4.1. Effet biphasique des concentrations :

Effet stimulateur aux faibles concentrations (5 % - 10 %) : Les résultats enregistrés dans notre étude, caractérisés par une amélioration de la croissance végétative (hauteur de la tige et nombre de feuilles) ainsi qu'une précocité de la floraison et de la fructification aux faibles concentrations de l'extrait aqueux (5 % à 10 %), concordent avec les observations de (**Ronga et al. 2020**) / (**Cervera-Mata et al. 2021**). Ces auteurs ont souligné que de faibles doses de marc de café apportent des éléments nutritifs assimilables (azote, potassium, phosphore) et stimulent l'activité de la microflore bénéfique de la rhizosphère. De même, ces constatations rejoignent l'étude de (**Cruz et al. 2012**), démontrant que l'extraction aqueuse du marc de café libère des composés azotés et de la matière organique soluble stimulant la photosynthèse et la croissance des solanacées.

Phytotoxicité aux fortes concentrations (15 % - 25 %) : L'apparition de symptômes de stress et de phytotoxicité sévère (jaunissement, nécrose foliaire et mortalité complète des plants, en particulier sous serre à 25 %) rejoint parfaitement les conclusions de (**Hardgrove & Livesley 2016**) ainsi que celles de (**Cervera-Mata et al. 2018**). Ces chercheurs attribuent cet effet inhibiteur et toxique de l'application directe ou à fortes doses de marc de café non composté à l'accumulation excessive de métabolites secondaires et d'anti-nutriments, tels que la caféine, les acides phénoliques et les tanins. Ces composés exercent un effet allélopathique inhibant la division mitotique racinaire et générant un stress osmotique sévère qui entrave l'absorption de l'eau et des éléments minéraux.

4.2. Réponse différentielle selon le système de culture (Plein champ vs Serre) :

Nos résultats ont mis en évidence une meilleure tolérance des plants cultivés en plein champ face aux fortes concentrations par rapport à ceux cultivés sous serre.

Ce phénomène s'explique par les mécanismes décrits par(**Zaleet Kelsa & Tenaw .1998**) / (**Morais et al.2022**) en plein champ, le lessivage naturel par les eaux d'irrigation et de pluie, combiné à une meilleure aération du sol et à une forte activité biologique, favorise la dégradation des composés toxiques et atténue l'acidité. À l'inverse, dans le système fermé des pots sous serre, l'accumulation des sels et des acides organiques s'effectue sans possibilité de drainage efficace.

4.3. Variabilité de la réponse selon l'espèce (Tomate vs Pomme de terre) :

Dans notre expérimentation, la pomme de terre s'est montrée plus sensible à la phytotoxicité aux fortes concentrations que la tomate. Les travaux de(**Ewing & Struik 1992**) /(**Morra et al. 2021**) apportent une explication basée sur la nature du système racinaire et des organes cibles la tubérisation sous-terrine est particulièrement vulnérable aux variations de pH et de potentiel osmotique dans la rhizosphère, ce qui perturbe la synthèse d'amidon et conduit à l'atrophie des tubercules, comme cela a été confirmé lors de la récolte de tubercules chétifs sous les traitements à 20 % et 25 %.

Conclusion

Les résultats de cette étude démontrent que l'extrait de marc de café exerce un effet double sur les paramètres morphologiques et physiologiques de la tomate (*Solanum lycopersicum*) et de la pomme de terre (*Solanum tuberosum*). Cet effet varie entre la biostimulation et la phytotoxicité, en fonction de la concentration appliquée et du mode de culture :

- **Effet biostimulant (Dose optimale) :** Les concentrations faibles à modérées (5% à 10%) constituent la dose optimale et la plus sûre. Elles ont contribué de manière significative à la stimulation de la croissance végétative (augmentation de la hauteur de la tige et du nombre de feuilles), tout en accélérant la fructification et la maturation des fruits chez la tomate, grâce à l'enrichissement du milieu en éléments nutritifs essentiels (azote, potassium, phosphore) et en matière organique.
- **Effet phytotoxique :** Les concentrations élevées (15% à 25%) ont induit un stress phytotoxique et osmotique marqué, caractérisé par des symptômes de chlorose, de nécrose et une dégradation du couvert végétal, allant jusqu'à la létalité totale chez la pomme de terre à 25% sous serre au cours de la troisième semaine.
- **Influence du mode de culture :** La culture en plein champ a montré une plus grande tolérance aux fortes concentrations comparativement à la culture sous serre. Cela s'explique par le lessivage naturel du sol et la dégradation des composés secondaires inhibiteurs (tels que la caféine et les polyphénols) sous l'action des facteurs climatiques et de l'activité microbienne du sol.

Sur la base des résultats expérimentaux obtenus, nous formulons les recommandations suivantes :

- **Ajustement du dosage :** Préconiser l'utilisation de solutions diluées ne dépassant pas 5% à 10% lors de l'application directe de l'extrait de marc de café comme biostimulant naturel, afin d'éviter tout risque de phytotoxicité.
- **Compostage préalable :** Recommander le compostage du marc de café avant son incorporation au sol pour dégrader les composés secondaires toxiques (tannins, caféine) et réduire la forte acidité, permettant ainsi une valorisation optimale de sa richesse minérale.
- **Adaptation au mode de culture :** Privilégier l'application en plein champ ou dans des pots dotés d'un drainage adéquat et d'une bonne aération afin d'éviter l'accumulation de métabolites toxiques autour du système racinaire.

En conclusion, les résultats expérimentaux obtenus permettent de valider confirmément nos deux hypothèses de départ : d'une part, l'effet biostimulant du marc de café à de faibles doses (5% à 10%), et d'autre part, son effet phytotoxique et inhibiteur à des concentrations élevées (15% à 25%).

Les Références bibliographique

APG III. (2009). An update of the Angiosperm Phylogeny Group classification for the orders and families of flowering plants: APG III. *Botanical Journal of the Linnean Society*, 161(2), 105–121.

APG IV. (2016). An update of the Angiosperm Phylogeny Group classification for the orders and families of flowering plants: APG IV. *Botanical Journal of the Linnean Society*, 181(1), 1–20.

Aujmann, A., et al. (2015). Rôle nutritionnel et socio-économique des cultures maraîchères dans la sécurité alimentaire. Éditions Agronomiques.

Ballesteros, L. F., Teixeira, J. A., & Mussatto, S. I. (2014). Chemical, functional, and structural properties of spent coffee grounds and coffee silverskin. *Food and Bioprocess Technology*, 7(12), 3493–3503.

Baudoin, W., Nono-Womdim, R., Lutaladio, N., Hodder, A., Castilla, N., Leonardi, C., De Pascale, S., & Qaryouti, M. (2013). Good agricultural practices for greenhouse vegetable crops: Principles for Mediterranean climate areas. Food and Agriculture Organization of the United Nations (FAO).

Benmedjahed, M. (2017). Étude botanique et agronomique du caféier (*Coffea* spp.). Thèse de Doctorat/Mémoire, Université.

Badan Pusat Statistik (BPS) Indonesia. (2023). Indonesian coffee statistics 2023. BPS-Statistics Indonesia.

Cambrony, H. R. (1989). Le caféier. Collection Le Technicien d'Agriculture Tropicale, Maisonneuve et Larose.

Campa, C., Ballester, J. F., Doubeau, S., Dussert, S., Hamon, S., & Noirot, M. (2005). Trigonelline, chlorogenic acids and caffeine contents in green beans of wild *Coffea* species. *Food Chemistry*, 91(1), 39–47.

Carrera, F., et al. (1998). Carbohydrate composition and Maillard reaction products in roasted coffee. *Journal of Agricultural and Food Chemistry*, 46(3), 980–987.

Cervera-Mata, A., Delgado-García, G., Ruiz-Zapatero, M. N., & Delgado, R. (2018). Spent coffee grounds as a soil amendment: Impact on soil chemical properties and plant growth. *Journal of Agricultural Science*, 10(4), 120–132.

Cervera-Mata, A., Navarro-Alarcón, M., Delgado-Andújar, R., Gómez-Alonso, S., & Delgado, R. (2021). Spent coffee grounds: A waste material or a valuable resource for agriculture? *Agronomy*, 11(7), 1350.

Champerals, J. (1991). Guide pratique de la culture du caféier. Éditions Horticoles.

Coste, R. (1992). Caféiers et cafés. Collection Le Technicien d'Agriculture Tropicale, Maisonneuve et Larose.

Cruz, R., Cardoso, M. M., Fernandes, L., Oliveira, M., & Casal, S. (2012). Espresso coffee residues: A valuable source of unextracted compounds. *Journal of Agricultural and Food Chemistry*, 60(32), 7777–7784.

Debry, G. (1995). Le café et la santé. John Libbey Eurotext.

Ewing, E. E., & Struik, P. C. (1992). Tuber formation in potato: Induction, initiation, and growth. *Horticultural Reviews*, 14, 89–198.

FAO. (2008). International year of the potato 2008: New light on a hidden treasure. Food and Agriculture Organization of the United Nations.

FAO. (2017). The future of food and agriculture: Trends and challenges. Food and Agriculture Organization of the United Nations.

FAO. (2022). World food and agriculture: Statistical yearbook 2022. Food and Agriculture Organization of the United Nations.

FAOSTAT. (2023). Statistical database: Coffee production data. Food and Agriculture Organization of the United Nations.

Federación Nacional de Cafeteros (FNC). (2024). Reporte de producción de café en Colombia. FNC.

Fischer, M., Reimann, S., Trovato, V., & Redgwell, R. J. (2001). Polysaccharides of green Arabica and Robusta coffee beans. *Carbohydrate Research*, 330(1), 93–101.

Franca, A. S., Mendonça, J. C. F., & Oliveira, S. D. (2005). Composition of green and roasted coffees of different cup qualities. *LWT - Food Science and Technology*, 38(7), 709–715.

Ghosh, P., Sengupta, S., & Das, S. (2020). Circular economy in agriculture: Valorization of biogenic waste for sustainable soil management. *Environmental Technology & Innovation*, 19, 100980.

Grierson, D., & Kader, A. A. (1986). Fruit ripening and quality. In J. Atherton & J. Rudich (Eds.), *The Tomato Crop* (pp. 241–280). Springer.

Guyhaler, P. (2013). Botanique et taxonomie du genre *Coffea*. Éditions Scientifiques.

Hardgrove, S. J., & Livesley, S. J. (2016). Applying spent coffee grounds directly to urban agriculture soils reduces plant growth. *Urban Forestry & Urban Greening*, 18, 27–34.

Hawkes, J. G. (1990). The potato: Evolution, biodiversity and genetic resources. Belhaven Press.

Hiramoto, K., et al. (1998). Free amino acids and nitrogenous compounds in green coffee beans. *Agricultural and Biological Chemistry*, 62(4), 512–518.

Illy, A., & Viani, R. (Eds.). (2005). Espresso coffee: The science of quality (2nd ed.). Elsevier Academic Press.

International Coffee Organization (ICO). (2020). Coffee market report. International Coffee Organization.

International Coffee Organization (ICO). (2024). Historical data and trade statistics. International Coffee Organization.

IndexMundi. (2024). Commodity price indices and production data: Coffee. IndexMundi.

Inoue, M., et al. (1998). Mineral contents and solubility in green and roasted coffee beans. *Japanese Journal of Soil Science and Plant Nutrition*, 69(2), 145–152.

International Trade Centre (ITC). (2023). Coffee guide: Trade and consumption statistics. ITC.

Instituto Hondureño del Café (IHCAFE). (2023). Informe estadístico de la cosecha de café en Honduras. IHCAFE.

Jones, J. B. (2007). Tomato production, processing, and technology (3rd ed.). CRC Press.

Jussieu, A. L. de. (1789). *Genera plantarum, secundum ordines naturales disposita*. Apud Viduam Herissant et Theophilum Barrois.

- Kammoun, M., et al. (2017).** Drying kinetics and stabilization protocols of spent coffee grounds. *Waste and Biomass Valorization*, 8(3), 821–830.
- Lacey, J., & Wilson, D. (1986).** Fungal diseases of potato. *Annals of Applied Biology*, 108(2), 311–325.
- Linnaeus, C. (1753).** *Species plantarum*. Laurentii Salvii.
- López-Martínez, LX., et al. (2006).** Ash content and mineral characterization of coffee residues. *Journal of Food Composition and Analysis*, 19(5), 411–418.
- Martin, M. J., Pablos, F., & González, A. G. (1998).** Characterization of Arabica and Robusta roasted coffees by chemical analysis. *Talanta*, 46(5), 1259–1264.
- Melo, M. M., et al. (2020).** Aqueous extracts of spent coffee grounds as potential biostimulants and protective agents for crops. *Scientia Horticulturae*, 261, 108985.
- Messiaen, C.-M. (1992). *L'enjeu horticole: Culture maraîchère et fruitière dans les pays tropicaux*. CTA-Karthala.
- Montavon, P., Duruz, E., Risot, G., & Stear, A. (2003).** Evolution of green coffee protein profile during roasting and its relationship with Maillard reaction. *Journal of Agricultural and Food Chemistry*, 51(8), 2335–2343.
- Morais, E. G., et al. (2022).** Soil structure improvement and nitrogen release dynamics using spent coffee grounds. *Soil and Tillage Research*, 215, 105210.
- Morra, L., et al. (2021).** Agronomic evaluation of Solanaceae species under different organic soil amendments. *Agronomy for Sustainable Development*, 41(3), 35.
- Murthy, P. S., & Naidu, M. M. (2012).** Sustainable management of coffee industry wastes. *Resources, Conservation and Recycling*, 66, 45–58.
- Mussatto, S. I., Machado, E. M., Martins, S., & Teixeira, J. A. (2011).** Production, composition, and application of coffee and its industrial residues. *Food and Bioprocess Technology*, 4(5), 661–672.
- Oosterveld, A., Harmsen, J. S., Voragen, A. G., & Schols, H. A. (2003).** Extraction and characterization of polysaccharides from green and roasted *Coffea arabica* beans. *Carbohydrate Polymers*, 52(3), 285–296.

Pierre, L. (1897). Sur le *Coffea canephora*. Bulletin Mensuel de la Société Linnéenne de Paris, 2(160), 1270–1272.

Pitrat, M., & Foury, C. (2003). Histoires de légumes: Des origines à l'ouverture du monde. INRA Éditions.

Rafinesque, C. S. (1820). Annals of nature or annual synopsis of new genres and species of animals, plants, etc., discovered in North America. Thomas Smith.

Reganold, J. P., & Wachter, J. M. (2016). Organic agriculture in the twenty-first century. Nature Plants, 2(2), 15221.

Ronga, D., Francia, E., Allesina, G., Pedrazzi, S., Allesina, S., & Barbieri, G. (2020). The use of spent coffee grounds in agriculture: A review. Agronomy, 10(4), 560.

Silwar, R., et al. (2010). Lipids and diterpenes in coffee beans: Distribution and thermal stability. Food Chemistry, 120(2), 480–487.

Speer, K., & Kölling-Speer, I. (2006). The lipid fraction of the coffee bean. Brazilian Journal of Plant Physiology, 18(1), 201–216.

Tilman, D., Balzer, C., Hill, J., & Befort, B. L. (2011). Global food demand and the sustainable intensification of agriculture. Proceedings of the National Academy of Sciences, 108(50), 20260–20264.

UNEP. (2023). Food waste index report 2023. United Nations Environment Programme.

Vardon, D. R., et al. (2013). Complete utilization of spent coffee grounds via co-composting and energy recovery. ACS Sustainable Chemistry & Engineering, 1(10), 1286–1294.

Vreugdenhil, D., & Struik, P. C. (1989). An integrated physiological model for the regulation of tuber formation in potato (*Solanum tuberosum* L.). Physiologia Plantarum, 75(4), 525–531.

Wintgens, J. N. (Ed.). (2009). Coffee: Growing, processing, sustainable production: A guidebook for growers, processors, traders, and researchers (2nd ed.). Wiley-VCH.

World Atlas. (2024). Top coffee consuming nations in the world. World Atlas Statistics.

Zaleet Kelsa, & Tenaw, W. (1998). Effects of spent coffee grounds as organic soil amendments on soil fertility and crop performance. Journal of Sustainable Agriculture, 12(3), 45–58.