



République Algérienne Démocratique Et Populaire
وزارة التعليم العالي والبحث العلمي
Ministère de l'Enseignement Supérieur et de la Recherche Scientifique
جامعة الشهيد الشيخ العربي التبسي – تبسة
Université Echahid Cheikh Larbi Tebessi – Tébessa
معهد المناجم
Institut des Mines
قسم المناجم والجيوتكنولوجيا
Département Mines Et Géotechnologie

MEMOIRE

Présenté en vue de l'obtention du diplôme de Master

Filière : Génie minier

Option : Exploitation des mines

**Optimisation du sciage au fil diamanté dans
L'exploitation de marbre : cas de FIL-FILA
, Skikda, Algérie.**

Par :

CHAOUCH Dalila

BOUGRIRES Amir

Devant le jury :

Mr.Saadaoui Salah	Président	MCB	Université Echahid Cheikh Larbi Tebessi – Tébessa
Mme.Merah Chafia	Encadreur	MCA	Université Echahid Cheikh Larbi Tebessi – Tébessa
Mme.Bouterfif Leila	Examineur	MAA	Université Echahid Cheikh Larbi Tebessi – Tébessa

Année universitaire 2025/2026

عن رئيس المجلس الشعبي البلدي
و يندويست
شهر سنة
ملحق رئيس الإدارة الإقليمية

الجمهورية الجزائرية الديمقراطية الشعبية
وزارة التعليم العالي والبحث العلمي

مؤسسة التعليم العالي : جامعة العربي التبسي - تبسة

تصريح شرفي
خاص بالالتزام بقواعد النزاهة العلمية لانجاز بحث

أنا الممضي أدناه،

الصفة : طالبة

المسيد (ة): شاوش دليلة

الحامل لبطاقة التعريف الوطنية رقم: 404165039 والصادرة بتاريخ : 2023/01/02

المسجلة بمعهد : المناجم قسم : استغلال المناجم

والمكلف بإنجاز أعمال بحث مذكرة ماستر عنوانها:

**Optimisation du sciage au fil diamanté dans
L'exploitation de marbre : cas de FIL-FILA
, Skikda, Algérie.**

أصرح بشرفي أنني ألتزم بمراعاة المعايير العلمية والمنهجية ومعايير الأخلاقيات المهنية والنزاهة الأكاديمية
المطلوبة في انجاز البحث المذكور أعلاه.

التاريخ: 04 جوان 2023

امضاء المعني (ة)

Année universitaire : 2025/2026

Tébessa le : 04 juin 2026

Lettre de soutenabilité

Noms et prénoms des étudiants :

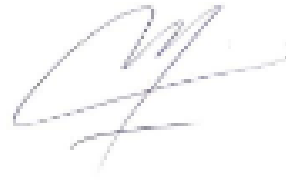
1- CHAOUCH Dalila

2-BOUGRIRES Amir

Niveau : **Master** Option : **Génie minier**

Thème : **Optimisation du sciage au fil diamanté dans
L'exploitation de marbre : cas de FIL-FILA, Skikda, Algérie.**

Nom et prénom de l'encadreur : **MERAH Chafia**

Chapitres réalisés	Signature de l'encadreur
Chapitre 1 : Le Marbre : Caractérisation, Marché Global et Cadre Géologique du Gisement de Filfila	
Chapitre 2: Présentation du site d'étude et méthodologie expérimentale	
Chapitre 3 : Optimisation du sciage au fil diamanté dans la carrière à blocs (FILFILA)	
Chapitre 4 : Partie économique	

Remerciements

Au terme de ce long parcours universitaire, notre premier sentiment est une profonde gratitude envers Dieu le Tout-Puissant, qui nous a accordé la volonté, la santé et la persévérance nécessaires pour mener à bien ce projet.

À celle qui a été bien plus qu'une encadrante, nous adressons nos remerciements les plus sincères et notre profond respect à Madame la Docteure *MERAH Chafia*. Merci pour votre immense générosité scientifique,

pour votre patience bienveillante, et pour la confiance que vous avez placée en nous. Vos conseils précieux et votre rigueur d'ingénieur resteront à jamais gravés dans notre parcours professionnel et humain.

Nous tenons également à remercier chaleureusement les membres du jury, qui nous font l'immense honneur d'évaluer ce travail. Nous sommes impatients de recevoir leurs critiques constructives pour enrichir nos connaissances.

Notre reconnaissance se tourne aussi vers le terrain, là où la théorie est devenue réalité. Un grand merci à la direction de l'entreprise ENAMARBRE, ainsi qu'à l'équipe technique et aux ouvriers de la Carrière de Filfila (Skikda). Merci pour votre accueil si chaleureux, pour votre précieux partage d'expérience autour de la machine Benetti Gamma 875, et pour nous avoir fait sentir, le temps d'un stage, que nous faisons déjà partie de votre grande famille professionnelle.

Enfin, ce travail est aussi le fruit du dévouement de nos enseignants à l'Institut des Mines de l'Université Larbi Tébessi. Merci d'avoir partagé votre savoir avec tant de passion. À tous ceux qui ont partagé nos doutes, nos veilles et nos moments de joie, à nos familles et nos amis : ce succès est le vôtre.



الاهداء

إلى من كلّهما الله بالهيبة والوقار.. إلى من أحمل اسمهما بكل فخر واعتزاز..

إلى والدي الكريم، سندي وعضدي في هذه الحياة، من علّمني أن الطموح لا حدود له، وأن النجاح يُبنى بالصبر والعمل إلى نبع العطاء والسكينة، من رافقتني دعواتها الصالحة في ظلمات الليالي، وكانت بلسماً لكل تعب.. أُمي الغالية، حفظها الله ورعاها وأطال في عمرها.

إلى إخوتي وأخواتي، رفقاء الدرب والطفولة، من كانوا لي دائماً مصدر تشجيع ودعم مستمر.

إلى زميلة هذا المشوار الدراسي وعمل الكفاح الميداني "دليلة"، التي شاركتني تعب وضغط اللحظات الحاسمة في إعداد هذا البحث، فكانت زعم الزميلة المتميزة بأخلاقتها وعملها.

إلى عائلتي الكبيرة، وكل الأصدقاء والزملاء الذين ساندوني بكلمة طيبة أو دعاء صادق في ظهر الغيب.

إليكم جميعاً، أهدي هذا العمل المتواضع
أمير



الاهداء

بسم الله الرحمن الرحيم
الحمد لله الذي بنعمته تتم الصالحات، والحمد لله الذي وفقني
وأعاني ومنَّ عليَّ بإتمام هذا العمل، فله سبحانه وتعالى الفضل
أولاً وآخراً، وله الحمد والشكر على ما أنعم به عليَّ من توفيق
ونجاح.

أهدي ثمرة جهدي المتواضع هذه إلى أغلى إنسانة في حياتي، إلى
أمي الحبيبة، التي كانت ولا تزال مصدر الحنان والعطاء، والتي
رافقتني بدعواتها الصادقة وصبرها وتضحياتها التي لا تُحصى. إلى
من سهرت من أجلي، وساندتني في لحظات التعب والضعف
وكانت سنداً لي في كل خطوة من خطوات حياتي. أسأل الله أن
يحفظها ويبارك في عمرها ويجزيها عني خير الجزاء
كما أهدي هذا العمل إلى عائلتي الكريمة، الذين كانوا دائماً إلى
جانبي بمحبتهم وتشجيعهم ودعمهم المتواصل، فكانوا خير عون
لي في مسيرتي الدراسية. شكراً لكل كلمة طيبة، ولكل دعاء
صادق، ولكل موقف دعم منحني القوة للاستمرار وتحقيق هذا
الإنجاز.

وإلى كل أفراد أسرتي الذين شاركوني فرحتي ووقفوا معي في
مختلف مراحل حياتي، أهدىكم هذا الجهد المتواضع عربون محبة
ووفاء وتقدير.

أسأل الله تعالى أن يجعل هذا العمل نافعاً ومباركاً، وأن يوفقنا
جميعاً لما يحب ويرضى.

إليكم جميعاً أهدي هذه المذكرة بكل حب واحترام وامتنان



Résumé

Cette étude porte sur l'optimisation des paramètres de découpe au fil diamanté dans la carrière de marbre de Filfila (Skikda), exploitée par l'Entreprise Nationale des Marbres (ENAMARBRE). Le point de départ est un constat de terrain : les opérateurs règlent les machines selon leur expérience personnelle, sans référence technique commune, ce qui entraîne une usure excessive du fil et des coûts d'exploitation inutilement élevés. L'objectif de ce travail est de remplacer cette approche conventionnelle par un modèle structuré, capable de garantir des performances stables et des économies mesurables.

Les essais ont été réalisés directement sur site, sur une machine Benetti Gamma 875, en suivant une méthode expérimentale rigoureuse qui consiste à analyser l'influence de chaque variable sur le rendement du sciage. Les mesures ont été effectuées à l'aide d'appareils de précision pour évaluer le courant électrique, l'usure des perles diamantées, ainsi que les temps de coupe. Les investigations ont porté successivement sur la vitesse d'avance, la hauteur du bloc, sa largeur, puis le débit d'eau de refroidissement.

Les résultats obtenus ont permis de standardiser une vitesse d'avance et un débit de refroidissement optimaux en fonction des dimensions réelles du front de taille. Sur le plan technique, l'usure du fil diamanté a été réduite de 10,4 % à 2,2 % par coupe. Sur le plan économique, le coût de production par bloc a été ramené de 2 032 DA à 592 DA, soit une économie majeure de plus de 71 %.

Ces résultats montrent qu'un ajustement méthodique des paramètres de coupe permet à ENAMARBRE de réaliser une économie annuelle estimée à plus de 1,2 million de dinars par machine. Au-delà du gain financier, ce modèle marque une transition vers un système de production industriel, piloté par des bases d'ingénierie solides.

Mots-clés : vitesse d'avance, coefficient de refroidissement spécifique, Fil diamanté, Le taux de découpe, Optimisation des paramètres de coupe, Usure du fil , Énergie électrique , Coût opérationnel

تتناول هذه الدراسة موضوع تحسين معاملات القطع بالسلك الماسي في محجر الرخام بموقع فلفلة (سكيكدة)، التابع وتهدف الدراسة إلى الانتقال من الأسلوب التجريبي العشوائي القائم على (ENAMARBRE) للمؤسسة الوطنية للرخام الخبرة الشخصية للعمال على أرض الموقع، إلى نموذج هندسي مضبوط يضمن الأداء المستقر والأمن للآلة ويحقق توفيراً اقتصادياً قابلاً للقياس

اعتمد البحث على المنهج التجريبي المباشر في الميدان، وتحديد استراتيجيات عزل المتغيرات (عامل واحد في كل مرة)، وذلك على آلة القطع من نوع "بينيتي غاما 875" المتواجدة في الموقع. وتمت متابعة القياسات الميدانية بدقة باستعمال أجهزة قياس شدة التيار الكهربائي، ومؤشرات تآكل حبات الماس، وحساب أوقات النشر وسرعات التقدم. وشملت التجارب أربع مراحل متتالية ركزت على سرعة النزول، ارتفاع الكتلة الصخرية، عرض النشر، وأخيراً تدفق مياه التبريد

وقد أسفرت النتائج الميدانية عن تحديد قيم نموذجية ومثالية لسرعة التقدم ومعدلات التدفق المائي للتبريد بما يتوافق مع الأبعاد الحقيقية لجبهة العمل. وعلى الصعيد التقني، انخفض تآكل السلك الماسي بشكل ملحوظ من 10.4% إلى 2.2% لكل عملية قطع. أما على الصعيد الاقتصادي، فقد تراجعت تكلفة إنتاج الكتلة الرخامية الواحدة من 2032 دج إلى 592 دج

71% محققة نسبة تفوق

تثبتت هذه المخرجات أن الضبط المنهجي لمعاملات القطع يسمح للمؤسسة بتحقيق وفر مالي سنوي يقدر بأكثر من 1.2 مليون دينار لكل آلة. وتكمن القيمة المضافة لهذا النموذج في قيادة المحجر نحو التحول من نمط الاستغلال التقليدي إلى منظومة إنتاج صناعية حديثة وموجهة بأسس هندسية صلبة

الكلمات المفتاحية: سرعة التقدم، معامل التبريد النوعي، مردود القطع، سلك ماسي، تحسين معاملات القطع، تآكل السلك، الطاقة الكهربائية، التكلفة التشغيلية

Abstract

This study focuses on optimizing diamond wire cutting parameters at the Filfila marble quarry (Skikda), operated by the National Marble Enterprise (ENAMARBRE). The investigation stems from a critical field observation: operators adjust machine parameters based purely on personal experience and empirical habits without a standardized technical reference. This non-methodical practice leads to premature diamond wire wear and excessively high operating costs. The primary objective of this research is to replace this empirical trial-and-error approach with a structured engineering model capable of ensuring consistent cutting performance and measurable resource savings.

The experimental trials were carried out directly on site using a Benetti Gamma 875 machine. Following a strict "One Factor At a Time" (OFAT) methodology, the direct influence of individual variables on cutting efficiency was precisely isolated. Technical data were gathered using precision instruments, including an ammeter to monitor motor current, a digital caliper to evaluate diamond bead wear, and a digital stopwatch to measure cutting time and feed rates. The research sequentially analyzed four operational parameters: feed speed, block height, cutting width, and cooling water flow rate.

The experimental results led to the standardization of an optimal feed rate and cooling water flow mechanism calibrated precisely against the real-time dimensions of the quarry benches. On a technical level, diamond wire wear was drastically reduced from 10.4% to 2.2% per cut. Economically, the direct production cost per extracted block plummeted from 2,032 DA to 592 DA, representing an exceptional cost reduction of over 71%.

These findings demonstrate that implementing a methodical, math-driven adjustment of cutting parameters enables ENAMARBRE to secure an estimated annual financial saving of over 1.2 million dinars per machine. Beyond the immediate financial benefits, this model establishes a fundamental technological transition, upgrading quarry operations from a traditional craft-based practice into an optimized, industrially structured production system.

Keywords : Feed rate , Specific cooling coefficient ,Cutting efficiency , Diamond wire ,Cutting parameter optimization , Wire wear ,Electrical energy , Operational cost

SOMMAIRE :

1.1 Définition et importance du marbre	5
1.1.1 Définition littéraire et historique	5
1.1.2 Définition géologique	5
1.1.3 Historique de l'exploitation et de l'usage du marbre	6
1.1.4 Genèse géologique du marbre	7
1.1.5 Classification minéralogique du marbre	10
1.1.6 Classifications commerciales et esthétiques du marbre	10
1.1.7 Domaines d'utilisation et applications industrielles du marbre	11
1.1.8 La notion historique de « marbres antiques »	13
1.2 Statistiques de production de marbre	14
1.2.1 À l'échelle mondiale	14
1.2.2 L'échelle nationale (Algérie)	16
1.2.3 À l'échelle locale : l'unité de production de Filfila (Skikda)	19
1.3 CADRE GÉOGRAPHIQUE ET ADMINISTRATIVE	20
1.3.2 Géomorphologie, orographie, végétation, climat	21
1.3.3 Historique des travaux	22
1.4 GEOLOGIE REGIONALE	23
1.4.1 Stratigraphie :	23
1.4.2 Ensemble allochtone kabyle	28
1.5 GEOLOGIE LOCALE	29
1.5.1 Stratigraphie	30
1.5.2 Complexe inférieur	31
1.5.3 Complexe moyen	32
1.5.4 Skarns à actinolite à la base	32
1.5.5 Marbres cristallins	32
1.5.6 Marbres gris clair	33

1.5.7 Marbres blancs	33
1.5.8 Argiles marneuses	33
1.5.9 Complexe supérieur	34
1.5.10 Dépôts du quaternaire	34
1.6 Tectonique	34
1.6.1 Ecaille inférieur	35
1.6.2 Écaille moyenne	35
1.6.3 Écaille supérieure	36
CONCLUSION	36
INTRODUCTION	39
2.1 Présentation de l'Entreprise Nationale de Marbre (ENAMARBRE)	39
2.1.1 Les Unités Opérationnelles d'ENAMARBRE :	40
2.2. Description de l'unité de production de Filfila	40
2.2.1. Historique de l'unité	40
2.2.2 Capacités et indicateurs de production de l'unité de Filfila	42
2.3 Procédure de gestion de la production de blocs de marbre	42
2.3.1 Méthode d'Exploitation	43
2.3.2 Cas d'utilisation de l'haveuse :	43
2.3.3 Cas sans Havage (par la machine au fil diamanté) :	44
2.3.4 Dimension des Masses	45
2.3.5 Définition des Objectifs de Production	46
2.3.6 Organisation de l'Exploitation	46
2.4 Programme de la Production Mensuelle	47
2.4.1 Qualité de la Production	48
2.4.2 Caractérisation et Classification de la Qualité de la Production	48
2.4.3 Comparaison entre le fil diamanté et la haveuse à chaîne	49
2.5 Généralités sur le sciage au fil diamanté	51

2.5.1 Composition de la machine au fil diamanté :	51
2.5.2 Constitution technique et composants du fil diamanté	51
2.5.3 Cinématique et Principe de Fonctionnement du Procédé	53
2.5.4 Description de l'équipement expérimental (Cas de la Benetti Gamma 875)	54
2.5.5 Caractérisation de l'outil de coupe : Le fil diamanté (Type Osadi)	56
2.5.6 Classification et Caractérisation des Paramètres de Sciage	58
2.6 Diagnostic des Contraintes Opératoires et Problèmes Actuels sur le Site de Filfila	59
2.6.1 Approche expérimentale et limites de la conduite de coupe existante sur site	59
2.6.2 Carence de régulation du fluide de refroidissement et saturation par les boues de sciage	60
2.6.3 Influence des réglages manuels et de la vétusté sur la stabilité de la machine	61
2.6.4 Conclusion du diagnostic : Vers une solution fondée sur une base scientifique	62
2.7 Protocole de Collecte des Données et Instrumentation Expérimentale	62
2.7.1 Phase 1 : Caractérisation géométrique du panneau de roche	62
2.7.2 Phase 2 : Suivi métrologique de l'usure du fil diamanté	63
2.7.3 Phase 3 : Chronométrage des cycles et calcul du rendement	64
2.7.4 Phase 4 : Monitoring de l'intensité électrique et de la résistance de coupe	64
2.7.5 Phase 5 : Quantification expérimentale du flux de refroidissement	66
2.8 Stratégie Expérimentale : La Méthode OFAT (One-Factor-At-a-Time)	67
2.8.1 Principe de l'approche OFAT	67
Conclusion	68
Introduction	70
3.1. Analyse expérimentale	70
3.1.1 Protocole d'optimisation des paramètres de coupe sur site :	71
3.1.2 Conditions initiales de l'expérimentation	72
3.1.3 Phase I : Variation de la vitesse	73
3.1.4 Protocole d'essais dans le terrain :	73

3.1.5 Protocole opératoire in situ :	73
3.1.6. Formalisme mathématique et outils de mesure :	73
3.2 Résultats et Interprétation	76
3.2.1. Synthèse des données expérimentales	76
3.2.2. Analyse de la réponse électrique du moteur	76
3.2.4. Réflexion sur le choix optimal : Entre calculs théoriques et réalité du terrain :	80
3.3. Phase II : Sensibilité de la hauteur du gradin (H)	81
3.3.1. Paramètres et objectifs de l'essai	81
3.3.2. Tableau de synthèse des essais de la Phase II	82
3.3.3 Analyse d'impact de la hauteur du gradin	84
3.4. Phase III : Évaluation de la stabilité opérationnelle sur de grandes surfaces	85
3.4.1. Paramètres et objectifs de l'essai	85
3.4.2. Tableau de synthèse des essais de la Phase III	86
3.4.3. Analyse de l'impact de la géométrie de coupe	88
3.4.4. Transition : de la surface totale à la largeur optimale (Lopt)	89
3.4.5. Synthèse de la surface de sciage optimisée	89
3.5. Phase IV : Optimisation du débit d'eau (Q)	90
3.5.1. Paramètres expérimentaux et protocole	90
3.5.3. Établissement de la règle de pilotage opérationnelle	92
3.6. Synthèse opérationnelle : Abaque de pilotage de la Gamma 875	93
3.6.1 Synthèse et Modélisation des Paramètres	94
3.6.2 Mise en œuvre pratique et formalisme mathématique	94
3.6.3 Analyse comparative des approches	95
3.6.4 Discussion des résultats	96
Conclusion	97
Introduction	99
4.1. Choix du cadre d'étude : Le bloc marchand	100

4.1.1. Détermination des coûts d'exploitation	101
4.1.2 Consommation et valorisation du fil diamanté	101
4.1.3 Coût de l'Énergie électrique et du système de Pompage	103
4.1.4. Coût de la Main-d'œuvre Directe	104
4.1.5. Structure et synthèse des dépenses opérationnelles (OPEX)	105
4.2 Analyse Financière de l'Approche conventionnelle	107
4.2.1 Évaluation des Paramètres de Sciage Actuels	107
4.2.2 Analyse de l'Écart de Performance et Impact Thermique	108
4.2.3 Évaluation de la Dégradation par Cycle de Coupe	109
4.2.4. Méthodologie de Valorisation des Écarts de Performance	110
4.2.5. Impact de l'Approche Conventionnelle sur les Coûts Opérationnels	112
4.3 Analyse Financière du Modèle Optimisé	113
4.3.1 Application des Nouveaux Paramètres de Coupe	114
4.3.2 Analyse du Coût d'Usure du Fil sur la Boucle de Travail	114
4.3.3. Rentabilisation de l'Énergie Électrique et du Pompage d'Eau	115
4.3.4. Bilan énergétique de l'approche conventionnelle (Terrain)	116
4.3.5. Bilan énergétique du modèle optimisé	116
4.4. Analyse des résultats et impacts industriels	117
4.4.1. Optimisation du Coût de la Main-d'œuvre Directe	119
4.4.2. Analyse du Coût de l'Approvisionnement en Eau	120
4.5. Synthèse de la Rentabilité Globale	121
4.5.1. Impact sur la Durée de Vie des Équipements	122
4.5.2. Comparaison de la Longévité du fil diamanté	122
4.5.3. Préservation du système électromécanique	123
4.6 Projection Économique	124
4.6.1 Analyse des projections financières :	124
Conclusion	125

SOMMAIRE

LIST DES TABLEAUX ET DES FIGURE

LISTE DES TABLEAUX :

Tableau 1.1 : Répartition de la production mondiale de marbre par principaux pays Producteurs (Données 2024-2025)	15
Tableau 1.2 : Principaux gisements de marbre en Algérie et leurs caractéristiques mécaniques et esthétiques.	18
Tableau 2.1: Indicateurs de production et état des réserves (2023-2024)	42
Tableau 2.2 : Comparaison technique entre le sciage au fil diamanté et la haveuse à chaîne	50
Tableau 2.3 : Fiche technique et caractéristiques opérationnelles de la scieuse au fil diamanté.	55
Tableau 2.4 : Classification et plages des paramètres de découpe recensés sur le site de Filfila. [23]	58
Tableau 2.5 : Analyse critique, avantages et limites de la stratégie expérimentale OFAT (D'après Montgomery, 2017).	67
Tableau 3.1 : Synthèse des indicateurs de performance du sciage (Gamma 875)	76
Tableau 3.2 : Données expérimentales du sciage en fonction de la hauteur du gradin (H)	82
Tableau 3.3 : Données expérimentales du sciage en fonction de la surface de coupe	87
Tableau 3.4 : Influence du débit d'eau sur les indicateurs de performance	90
Tableau 3.5 : Abaque de réglage (Cible Taux de Découpe = 4,0 m ² /h)	93
Tableau 3.6 : Analyse comparative entre l'approche actuelle et le modèle d'optimisation	96
Tableau 4.1 : Répartition type des coûts d'exploitation	106
Tableau 4.2 : Seuils d'usure du fil diamanté (Site de Filfila)	109
Tableau 4.3 Tableau comparatif de la consommation du matériel	111
Tableau 4.4 : Synthèse des charges d'exploitation avant optimisation	112
Tableau 4.5 : Bilan des économies directes sur la consommation du fil diamanté	115

LIST DES TABLEAUX ET DES FIGURE

Tableau 4.6 : Comparaison de la performance énergétique par bloc	117
Tableau 4.7 : Analyse comparative du coût de la main-d'œuvre directe	120
Tableau 4.8 : Synthèse comparative des coûts de production directs par bloc (DA)	122
Tableau 4.9 : Performance de production du fil diamanté (Boucle de 7 m)	123
Tableau 4.10: Projection des gains financiers liés à l'optimisation	124

LISTE DES FIGURES :

Figure 1.1 Exemples de blocs de marbre brut	6
Figure 1.2 : Illustration de l'usage architectural du marbre au sein de la Grande Mosquée d'Alger.	7
Figure 1.3 : Comparaison microscopique (lames minces) entre le calcaire d'origine (roche sédimentaire) et le marbre recristallisé (roche métamorphique).	9
Figure 1.4 : Modèle schématisé de l'évolution géodynamique et de la genèse du marbre.	9
Figure 1.5 : Blocs de marbre marchands après extraction et équarrissage en carrière.	13
Figure 1.6 : Diversité pétrographique des roches classées historiquement comme « marbres antiques ». [7]	14
Figure 1.7 : Carte des principales ressources minérales d'Algérie	17
Figure 1.8 : Échantillons des principales variétés de marbres algériens.	17
Figure 1.9 : Bloc monolithique de marbre blanc extrait par découpe au fil diamanté – Site de Filfila (Cliché personnel, 03 février 2026).	20
Figure 1.10 : Vue satellitaire de la situation géographique (Source : Google Earth, 20/04/2026)	21
Figure 1.11 : Carte géologique simplifiée du massif de Fil-Fila et ses unités limitrophes	30
Figure 2.1 : Vue aérienne de la carrière de Filfila montrant le front de taille et la disposition des gradins (Source : Google Earth, 10/04/2026)	41
Figure 2.2 : Haveuse à chaîne en opération sur le front de taille – Unité d'exploitation de Filfila (Cliché personnel, 14 février 2026).	43
Figure 2.3 : Machine de découpe au fil diamanté (Modèle Gamma 875) en position sur le site d'exploitation – Unité de Filfila (Cliché personnel, février 2026).	44
Figure 2.4 : Schéma descriptif de l'installation de sciage en carrière et constitution technique détaillée du fil diamanté (Adapté d'après Lanzetta et al., 2003 [12]).	51
Figure 2.5 : Structure mécanique et composants principaux d'un fil diamanté.	52

LIST DES TABLEAUX ET DES FIGURE

Figure 2.6 : Implantation de l'unité de sciage au fil diamanté Benetti Gamma 875 sur le site de Filfila, mettant en évidence le pupitre de commande et les rails de translation	55
Figure 2.7 : Mesure métrologique du diamètre initial ($d=10,53$ mm) d'une perle diamantée neuve à l'aide d'un pied à coulisse numérique de précision.	57
Figure 2.8 : Observation directe et supervision visuelle du processus de sciage par les opérateurs pour un réglage manuel basé sur l'expérience de terrain.	60
Figure 2.9: Accumulation importante de boue blanche sur la plate-forme de travail, démontrant un débit d'eau empirique et non contrôlé .	61
Figure 2.10 : Morphologie d'un bloc de marbre sur le front de taille lors de la phase de relevé des dimensions macroscopiques (Cliché personnel, 03 février 2026).	63
Figure 2.11 : Schéma descriptif de l'évolution morphologique de la perle témoin et positionnement du repère de mesure en cuivre	64
Figure 2.12 : Configuration générale du pupitre de commande déporté de la scieuse Gamma 875 (Cliché personnel, 12 février 2026).	65
Figure 2.13 : Gros plan sur l'ampèremètre de contrôle de la charge du moteur principal (Cliché personnel, 17 février 2026).	66
Figure 3.1 : Schéma illustrant les étapes de la méthode (OFAT)	72
Figure 3.2 : Mesure du diamètre d'une perle (Cliché personnel, 25/02/2026).	74
Figure 3.3 : Lecture de l'intensité sur l'ampèremètre analogique de la machine (Cliché personnel, 16/02/2026)	75
Figure 3.4 : Évolution de l'intensité de courant absorbé (I) en fonction de la vitesse d'avance (V_a).	77
Figure 3.5 : Influence de la vitesse d'avance (V_a) sur l'usure du fil (mm).	78
Figure 3.6 : Évolution conjointe du temps de sciage et de l'usure du fil en fonction de la vitesse d'avance.	79
Figure 3.7 : Influence de la hauteur du gradin (H) sur l'intensité du moteur principal (I)	83
Figure 3.8 : Influence de la hauteur du gradin (H) sur l'usure du fil diamanté	83
Figure 3.10 : Évolution de l'usure cumulative du fil diamanté en fonction de la surface sciée	88
Figure 3.12 : Variation de l'usure en fonction du débit d'eau	91
Figure 4.1 : Processus de recyclage des segments de fil	102
Figure 4.3 : Répartition des Coûts d'Exploitation (Diagramme circulaire mettant en évidence le poids du fil diamanté).	106

LIST DES TABLEAUX ET DES FIGURE

Figure 4.4 : Courbe de pilotage théorique et positionnement du point critique conventionnelle	107
Figure 4.5 : Mesure au pied à coulisse numérique de l'évolution diamétrale d'une perle	110
Figure 4.6 : Répartition analytique des pertes financières induites par la méthode conventionnelle (actuelle).	113
Figure 4.7 : Comparaison des coûts d'usure du fil diamanté par bloc (DA)	115
Figure 4.8 : Analyse comparative de l'efficacité énergétique par bloc (DA	118
Figure 4.9 : Répartition des charges dans le modèle optimisé en DA	124

INTRODUCTION GÉNÉRALE

Introduction générale

Dans le cadre de l'exploitation du marbre au gisement de Filfila (Skikda), la recherche d'une meilleure productivité a conduit à l'adoption des machines de découpe au fil diamanté. Cette technologie permet l'extraction de blocs monolithiques de grandes dimensions et constitue aujourd'hui un procédé largement utilisé dans les opérations de sciage des roches ornementales.

À ce titre, il convient de préciser que la méthode conventionnelle désigne l'ensemble des pratiques de sciage actuellement en vigueur sur le site, caractérisées par un pilotage manuel et empirique des paramètres. Elle privilégie le rendement de coupe instantané au détriment de la préservation de l'outil diamanté et de l'intégrité électromécanique de la machine.

Face à ce constat, notre travail de recherche se donne pour objectif principal de rationaliser ce processus de sciage en corrélant scientifiquement les variables cinématiques de la machine à savoir la vitesse d'avance (V_a) et la surface de coupe avec la consommation d'énergie spécifique (E_s) ainsi que le taux d'usure du fil (Δd).

Pour substituer des règles opérationnelles rigoureuses aux pratiques traditionnelles du chantier, nous avons déployé une approche articulée autour d'un suivi expérimental et d'une analyse analytique. La première phase a consisté à mener des essais in situ en adoptant la méthodologie « OFAT » (One-Factor-at-a-Time), isolant l'effet de la vitesse d'avance (V_a) par le maintien des autres facteurs constants. Les données réelles ainsi collectées (intensités du courant, temps de coupe, avancement) ont été couplées, dans un second temps, aux équations fondamentales de l'électrotechnique afin d'établir le bilan énergétique réel du moteur de la centrale.

Pour exposer notre démarche et ses conclusions, ce mémoire s'organise autour de quatre chapitres complémentaires :

Le **premier chapitre** pose les bases théoriques à travers une caractérisation du marbre, un aperçu du marché mondial et une description du cadre géologique de Filfila.

Le **deuxième chapitre** décrit l'environnement physique de la carrière étudiée et détaille le protocole expérimental mis en œuvre.

Le **troisième chapitre** rassemble et analyse nos données brutes de terrain, mettant en lumière l'impact direct du régime de marche sur la productivité et la dégradation physique du fil.

Enfin, le **quatrième chapitre** traduit ces optimisations techniques en indicateurs financiers, évaluant le coût de revient au mètre carré (DA/m) et les gains économiques globaux générés pour l'exploitant.

CHAPITRE 1

LE MARBRE : CARACTÉRISATION, MARCHÉ GLOBAL ET CADRE GÉOLOGIQUE DU GISEMENT DE FILFILA

INTRODUCTION

Depuis l'Antiquité, le marbre est intimement lié à l'histoire de l'architecture et des civilisations, s'imposant à la fois comme un matériau de construction noble et comme un symbole de pérennité. Aujourd'hui, son extraction industrielle représente un défi d'ingénierie majeur, où la maîtrise technique doit s'allier à la précision géologique pour optimiser la valorisation de cette ressource naturelle.

Ce chapitre a pour objectif d'explorer la filière du marbre en mettant en lumière son importance socio-économique et ses caractéristiques géomécaniques exceptionnelles. Nous aborderons les principes fondamentaux de sa méthode d'exploitation en carrière, tout en analysant les défis techniques et humains qui conditionnent la productivité et la sécurité des opérations. Enfin, cette étude sera ancrée dans le contexte spécifique du gisement de Filfila (Skikda), un site stratégique qui incarne le potentiel et la richesse du patrimoine marbrier Algérien.

1.1 Définition et importance du marbre

1.1.1 Définition littéraire et historique

Sur le plan littéraire et historique, le mot « marbre » est un terme traditionnel issu du grec *marmaros*, qui signifie « pierre éclatante », puis du latin *marmor*, désignant toute pierre dont la surface est susceptible de recevoir un poli spéculaire par frottement et lissage. Initialement, ce terme ne renvoyait donc pas à une composition minéralogique précise, mais plutôt à la capacité d'une roche à être polie et à réfléchir la lumière. [1]

1.1.2 Définition géologique

Sur le plan scientifique, le marbre est une roche métamorphique dérivant de la transformation de roches carbonatées préexistantes. Il s'agit de calcaires ou de dolomies sédimentaires qui ont été modifiés par un métamorphisme régional ou, plus rarement, par un métamorphisme de contact (thermique).

Au cours de ce processus de recristallisation sous l'effet de la pression et de la température, les structures sédimentaires originelles (stratifications, fossiles) sont généralement gommées. La roche carbonatée initiale se restructure en un agrégat mosaïque de cristaux de calcite et/ou de dolomie intimement imbriqués.

Les dimensions de ces grains cristallins peuvent varier de l'échelle millimétrique à centimétrique. Par ailleurs, la présence d'impuretés au sein du carbonate originel telles que des intercalations d'argile, des minéraux détritiques (quartz, feldspaths) ou des oxydes métalliques confère au marbre une grande variété de teintes, de rubanements et de veinures polychromatiques, ce qui lui donne sa valeur esthétique et commerciale [1].



Figure 1.1 Exemples de blocs de marbre brut[1].

1.1.3 Historique de l'exploitation et de l'usage du marbre

Durant la période de la Grèce antique, le marbre était principalement valorisé dans le domaine artistique et sculptural. En raison de sa rareté, de sa densité, de sa fragilité lors de la taille et de sa haute valeur marchande, sa mise en œuvre était réservée à des artisans hautement qualifiés. Déjà exploité par la civilisation des Cyclades pour la confection d'idoles funéraires stylisées, ce matériau a ensuite été extrait en grandes masses pour l'édification d'ouvrages architecturaux et religieux majeurs, tels que des temples, des tombeaux, ou encore des infrastructures sportives (stades).

L'Empire romain, partageant cet engouement, a institutionnalisé la recherche de gisements et a considérablement perfectionné les méthodes d'extraction en carrière ainsi que les techniques de transformation. Le marbre figurait alors parmi les richesses stratégiques rapportées par les armées romaines des provinces conquises, au même titre que les métaux précieux, les denrées rares ou les épices.

Cette substance minérale, devenue symbole de prestige, de pouvoir et de pérennité, a été intégrée aux œuvres architecturales et artistiques les plus emblématiques de l'histoire humaine. Parmi celles-ci, on peut citer:

- L'Acropole d'Athènes et les monuments de la Rome antique ;
- La basilique Sainte-Sophie de Constantinople (Istanbul) ;
- Le complexe monumental de la cathédrale de Pise ;
- Le *David* de Michel-Ange ;
- Les temples jaïns et le Taj Mahal en Inde ;
- La Grande Mosquée d'Alger ;
- L'Arche de la Défense à Paris (Puteaux).

Sur le plan réglementaire et économique international, l'importance de cette roche est telle qu'elle fait partie des trois pierres de construction officiellement reconnues et classées par l'État du Vermont aux États-Unis, aux côtés du granite et de l'ardoise [2].



Figure 1.2 : Illustration de l'usage architectural du marbre au sein de la Grande Mosquée d'Alger[2].

1.1.4 Genèse géologique du marbre

La grande majorité des gisements de marbre est issue de dépôts de carbonates marins (calcaires ou dolomies) formés en milieu océanique. Ces sédiments se sont accumulés de manière prépondérante entre le Dévonien supérieur et le Carbonifère inférieur, sur une période estimée à environ 50 millions d'années (soit entre 380 et 330 Ma).

Initialement, ces sédiments carbonatés subissent les étapes de la diagenèse au sein des bassins sédimentaires pour se transformer en roches calcaires consolidées. Par la suite, sous l'effet de la dynamique des plaques et des mouvements tectoniques liés aux phases d'orogénèse notamment durant le cycle hercynien (varisque), s'étendant de 416 à 251 Ma, ces formations calcaires sont enfouies à de grandes profondeurs et/ou soumises à des gradients géothermiques élevés.

Ce changement drastique d'environnement physico-chimique déclenche le processus de métamorphisme. Selon le contexte géodynamique, celui-ci peut être :

- **Un métamorphisme régional** : provoqué par un enfouissement à grande échelle lors de collisions continentales, associant de fortes pressions (P) et de hautes températures (T).
- **Un métamorphisme de contact (thermique)** : généré par l'intrusion de corps magmatiques ascendants, transmettant une chaleur intense aux roches encaissantes.

Sous l'effet combiné de ces contraintes de pression et de température, le calcaire initial subit une recristallisation syntectonique. Les minéraux d'origine se réorganisent, et de nouveaux cristaux de calcite et/ou de dolomie se développent, adoptant des formes généralement xénomorphes (irrégulières) qui s'imbriquent pour former une **texture granoblastique en mosaïque** caractéristique. Au cours de cette transformation complète, les structures sédimentaires originelles (fossiles, stratifications fines) deviennent macroscopiquement et microscopiquement indiscernables.

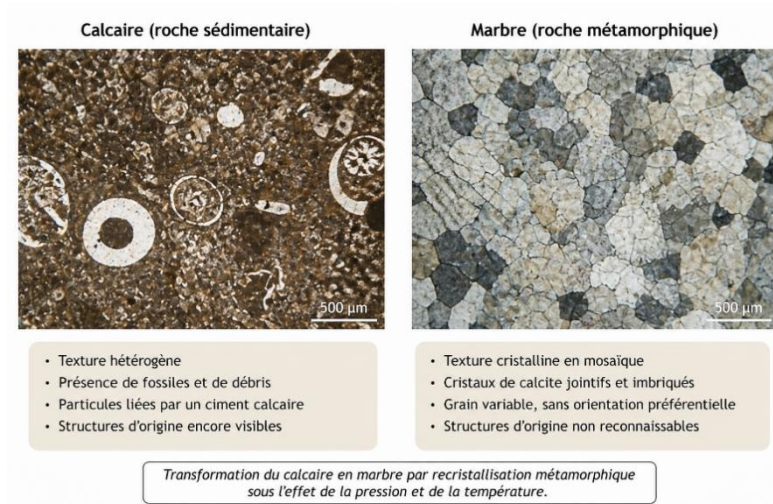


Figure 1.3 : Comparaison microscopique (lames minces) entre le calcaire d'origine (roche sédimentaire) et le marbre recristallisé (roche métamorphique).

À l'échelle macro-structurale, les phases d'orogénèse provoquent également la mise en place d'intrusions plutoniques. La remontée de ces masses magmatiques anciennes, telles que les granites, induit le soulèvement, le plissement et le charriage des couvertures sédimentaires paléozoïques. Ces séries plissées se structurent et s'accumulent aux marges des grandes chaînes de montagnes, formant des complexes de collines calcaires. Soumises localement et régionalement aux contraintes tectoniques majeures, ces formations carbonatées achèvent leur transformation métamorphique pour constituer les gisements de marbre exploitables aujourd'hui [3].

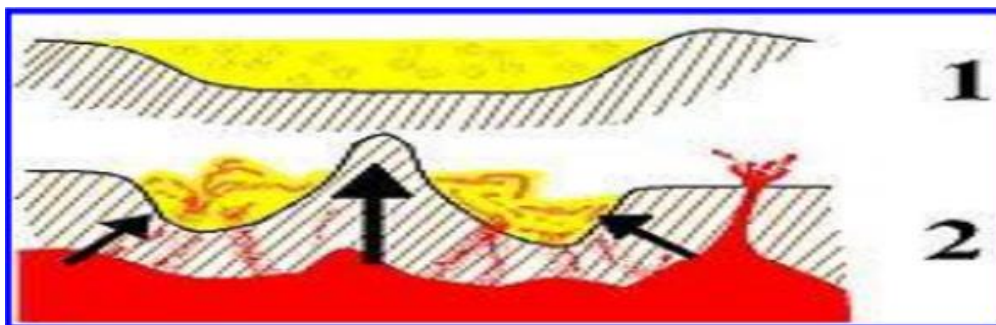


Figure 1.4 : Modèle schématique de l'évolution géodynamique et de la genèse du marbre[3].

1.1.5 Classification minéralogique du marbre

Sur le plan de la composition chimique et minéralogique, on distingue principalement deux grandes catégories de marbre, reliées par toute une gamme de compositions intermédiaires :

- **Le marbre calcique (ou calcaire) :** Composé majoritairement de calcite (CaCO_3). C'est la variété la plus fréquente, caractérisée par une densité standard et une bonne aptitude au polissage.
- **Le marbre dolomitique :** Issu du métamorphisme de la dolomie (roche sédimentaire carbonatée riche en magnésium). Il est constitué de dolomite ($\text{CaMg}(\text{CO}_3)_2$). La présence de magnésium modifie légèrement ses propriétés physiques, augmentant parfois sa dureté et sa résistance aux agents chimiques [4].

1.1.6 Classifications commerciales et esthétiques du marbre

Dans l'industrie des pierres ornementales, le marbre est classé selon ses critères visuels, notamment l'aspect de sa matrice (le fond) et la présence de discontinuités chromatiques (les veines).

D'un point de vue structural, les marbres dits « **veinés** » ou « **bréchiques** » résultent de roches qui se sont fracturées sous l'effet de contraintes tectoniques (pressions orientées). Les microfissures et jonctions ainsi créées ont été colmatées par la circulation de fluides hydrothermaux chargés en minéraux et en oxydes, donnant naissance à ces lignes colorées caractéristiques.

Parmi les variétés de marbres de grande valeur commerciale et historique, on distingue notamment :

- **Le Blanc de Carrare :** Bien que ce nom désigne historiquement la célèbre région d'extraction en Italie, il est devenu une référence de classification esthétique. Il se caractérise par des veines grises bleuté subtiles qui se fondent dans une matrice d'un blanc pur.
- **Le Vert de Mer :** Très répandu dans le bassin méditerranéen, il présente un réseau serré de veines vert blanchâtre sur un fond sombre, presque noirâtre. Sur le plan géologique, sa couleur n'est pas d'origine végétale, mais s'explique par la présence de minéraux

silicatés spécifiques comme la serpentine, la chlorite ou l'épidote, formés lors du métamorphisme.

- **Les Marbres Jaunes** : Ils présentent généralement une matrice jaune clair lacérée de veines orangées à rougeâtres [4].

Influence des impuretés sur les propriétés physiques

En principe, un marbre géologiquement pur (constitué à 100 % de calcite ou de dolomie recristallisée) est rigoureusement blanc et homogène. Les variations chromatiques et mécaniques dépendent entièrement des minéraux accessoires dispersés dans la masse ou concentrés dans les veines :

- **Les oxydes de fer et de manganèse** : Confèrent les teintes rouges, jaunes, roses et brunes.
- **La silice (sous forme de quartz)** : Agit comme un agent durcissant majeur. La présence de quartz augmente l'abrasivité de la roche, ce qui influence directement le choix des outils de coupe (fil diamanté, disques) et la réponse de la pierre lors du sciage en carrière ou du façonnage.
- **Les matières carbonées ou le graphite** : Donnent les nuances grises à noires.

1.1.7 Domaines d'utilisation et applications industrielles du marbre

Le marbre figure parmi les pierres naturelles les plus exploitées et les plus valorisées à l'échelle mondiale. En raison de ses caractéristiques pétrographiques, de sa durabilité, de sa résistance mécanique et de sa grande variété esthétique (teintes et veinages), il offre un spectre d'applications industrielles et architecturales bien plus large que la majorité des autres roches ornementales.

Les critères de choix d'un marbre pour une application donnée dépendent directement de ses propriétés physiques (porosité, résistance à la compression, gélivité) et de la qualité des blocs extraits en carrière. On distingue principalement deux grands secteurs d'utilisation [5]:

A. Le secteur du bâtiment et des travaux publics (BTP)

C'est le principal débouché économique des produits marbriers. Le marbre y est utilisé sous forme de dalles, de plaques façonnées ou de revêtements :

- **Revêtements de sol (intérieurs et extérieurs) :** Apprécié pour sa haute résistance à l'usure et son aptitude au grand passage après polissage.
- **Revêtements de façades et parements extérieurs :** Utilisé pour l'habillage thermique et esthétique des édifices modernes.
- **Aménagements intérieurs et éléments de décoration :** Habillage de parois murales, margelles de cheminées, escaliers, colonnes, plans de travail de cuisines et de salles de bains.
- **Mobilier urbain et aménagements paysagers :** Bordures, fontaines, revêtements de places publiques et dalles de voirie de prestige.

B. L'art funéraire, la sculpture et l'ornementation

Historiquement majeur, ce secteur exige des marbres d'une grande pureté (souvent des marbres blancs homogènes sans fissures internes, dits « statuaire ») permettant une réponse optimale sous l'outil de taille :

- **Sculpture monumentale et statues :** Valorisation de la texture fine et de la translucidité de la roche.
- **Objets d'ornementation et artisanat d'art :** Vases, coupes, incrustations de marqueterie de pierre.
- **Art funéraire :** Confection de stèles, monuments et pierres tombales, secteur grand consommateur de roche massive résistant aux intempéries.



Figure 1.5 : Blocs de marbre marchands après extraction et équarrissage en carrière. [5]

1.1.8 La notion historique de « marbres antiques »

La classification historique des « marbres antiques » repose sur l'acceptation originelle et macroscopique du terme, à savoir toute roche naturelle cohérente susceptible de prendre un fini brillant après polissage et lustrage. Cette définition, partagée à travers les âges (*marmaros* en grec, *marmor* en latin, *marmo* en italien), diffère notablement de la définition géologique moderne. De ce fait, la catégorie des marbres antiques regroupe un ensemble hétérogène de roches (Figure 1.6) :

- **Des marbres au sens strict** : Calcaires sédimentaires métamorphisés et entièrement recristallisés.
- **Des roches sédimentaires carbonatées dures** : Calcaires compacts, brèches sédimentaires ou albâtres.
- **Des roches magmatiques et métamorphiques siliceuses** : Matériaux d'une dureté et d'une abrasivité largement supérieures aux carbonates, tels que les granites, les diorites, les gneiss, les porphyres, les basaltes ou les serpentinites.

Sur le plan de la provenance géopolitique et des flux commerciaux de l'époque, les principaux bassins d'extraction de ces marbres historiques étaient localisés dans les grandes provinces de l'Antiquité, notamment [6] :

- **Les marbres italiens** : (ex. : le blanc de Carrare/Luna).
- **Les marbres grecs** : (ex. : le marbre pentélique).
- **Les marbres d'Asie Mineure** : (région de la Turquie actuelle, ex. : le pavonazzetto).
- **Les marbres égyptiens** : (caractérisés par les porphyres impériaux et les granites).
- **Les marbres de la péninsule Ibérique** : (gisements d'Espagne et du Portugal).
- **Les marbres africains** : Extraits principalement le long de la frange nord-africaine (Numidie), englobant notamment les célèbres gisements de marbre jaune antique de Chemtou (Tunisie) et les occurrences de l'Ouest et du Nord de l'Algérie.



Echantillons de marbres antiques : 10 = marbre jaune antique de Chemtou ; arrière-plan : à gauche, brèche de Skyros (Grèce), à droite, 7 = marbre portasanta de Chios (Grèce) - Musée gallo-romain de Fourvière à Lyon.

Figure 1.6 : Diversité pétrographique des roches classées historiquement comme « marbres antiques ». [7]

1.2 Statistiques de production de marbre

1.2.1 À l'échelle mondiale

Selon les récentes données statistiques sectorielles (2024-2025), le marché mondial des roches carbonatées ornementales (marbre) est caractérisé par une forte concentration géographique. En effet, une dizaine de pays contrôlent plus de 90 % de la production globale.

La République Populaire de Chine occupe la position de leader hégémonique, immédiatement suivie par l'Inde et la Turquie. Quant à l'Algérie, bien que son secteur des substances minérales utiles et des pierres industrielles soit en phase de restructuration et de développement, elle affiche de fortes ambitions de croissance. Le pays vise à accroître ses parts de marché à

l'international en s'appuyant sur un potentiel gîtologique remarquable, illustré par des gisements de classe mondiale tels que ceux du massif de Filfila (Wilaya de Skikda), réputés pour la haute qualité physico-mécanique et esthétique de leurs marbres. [8]

Tableau 1.1 : Répartition de la production mondiale de marbre par principaux pays
Producteurs (Données 2024-2025) [9]

Rang	Pays producteurs	Part de production (%)	Observations et spécificités lithologiques
1	Chine	35 %	Leader mondial incontesté ; dominance des variétés de marbres blancs et gris.
2	Inde	15 %	Croissance soutenue ; forte orientation vers le marbre vert (<i>Vermont</i> et <i>Guatemala</i> indien).
3	Turquie	12 %	Plus grande diversité lithologique et chromatique ; exportateur majeur de blocs bruts.
4	Italie	9 %	Référence technologique et qualitative globale (ex: Marbre blanc de Carrare).
5	Espagne	5 %	Spécialisation et monopole sur la variété <i>Crema Marfil</i> .
6	Iran	4 %	Richesse gîtologique unique en marbre Onyx et en Travertins de haute valeur.
7	Égypte	3 %	Dynamique d'extraction croissante, notamment la variété <i>Galala</i> .
8	Brésil	3 %	Connu pour ses quartzites, granits et marbres exotiques à haute valeur marchande.
9	Grèce	2 %	Production historique et séculaire (notamment le blanc pur de <i>Thassos</i>).
10	Portugal	2 %	Reconnu mondialement pour ses variétés de marbres roses

Analyse et interprétation des données

L'examen analytique des données du **Tableau 1.1** permet de dresser un état des lieux de la configuration technico-économique de l'industrie de la pierre ornementale à l'horizon 2025 :

- **L'hégémonie du pôle asiatique :** La Chine et l'Inde confirment leur suprématie sur le marché mondial, totalisant à elles seules la moitié de la production globale (50 %). Cette position dominante est le résultat direct de l'immensité de leurs réserves géologiques exploitables, couplée à une modernisation massive des infrastructures d'extraction en carrière (généralisation du découpage au fil diamanté et abattage primaire contrôlé).
- **Le positionnement stratégique de la Turquie :** Occupant la troisième place mondiale (12 %), la Turquie tire profit d'une politique agressive d'exportation de blocs bruts et d'une diversité lithologique exceptionnelle. Sa position géographique lui confère un rôle de hub logistique incontournable entre les marchés demandeurs européens, asiatiques et du Moyen-Orient.
- **L'excellence et le savoir-faire italien :** Bien que devancée en volume par les géants asiatiques et la Turquie, l'Italie (9 %) maintient son leadership en termes de valeur ajoutée financière. Elle demeure la référence scientifique et technologique absolue pour les équipements de transformation (lames de châssis, lignes de polissage) et valorise ses ressources historiques, à l'instar du marbre de Carrare, sur les segments de marché de luxe.
- **L'émergence de nouveaux pôles miniers :** On observe une montée en puissance significative de pays du Moyen-Orient et de l'Afrique du Nord (MENA), à l'instar de l'Iran et de l'Égypte. Ces nations investissent massivement dans les technologies de l'industrie extractive afin de valoriser leurs ressources minérales locales, s'inscrivant dans une logique de diversification économique hors-hydrocarbures (similairement à la stratégie minière actuelle de l'Algérie).

1.2.2 L'échelle nationale (Algérie)

L'Algérie recèle un important potentiel géologique en substances minérales utiles, et plus particulièrement en roches carbonatées ornementales. Le territoire national dispose de réserves massives de marbres et de granits réparties sur plusieurs pôles géographiques majeurs, allant du littoral septentrional jusqu'aux confins du bouclier touareg (Hoggar). Bien que la contribution de la production algérienne demeure encore modeste vis-à-vis des géants du marché mondial, le secteur de la pierre naturelle connaît une dynamique de restructuration profonde. Cette modernisation s'articule autour de la création d'emplois locaux, de la réduction de la facture d'importation et de la promotion des exportations. Elle repose sur l'intégration progressive de technologies extractives performantes, à l'instar du procédé de découpe au fil

diamanté, visant à optimiser la productivité et la compétitivité des exploitations (voir la carte des ressources et le tableau 1.2). [10]

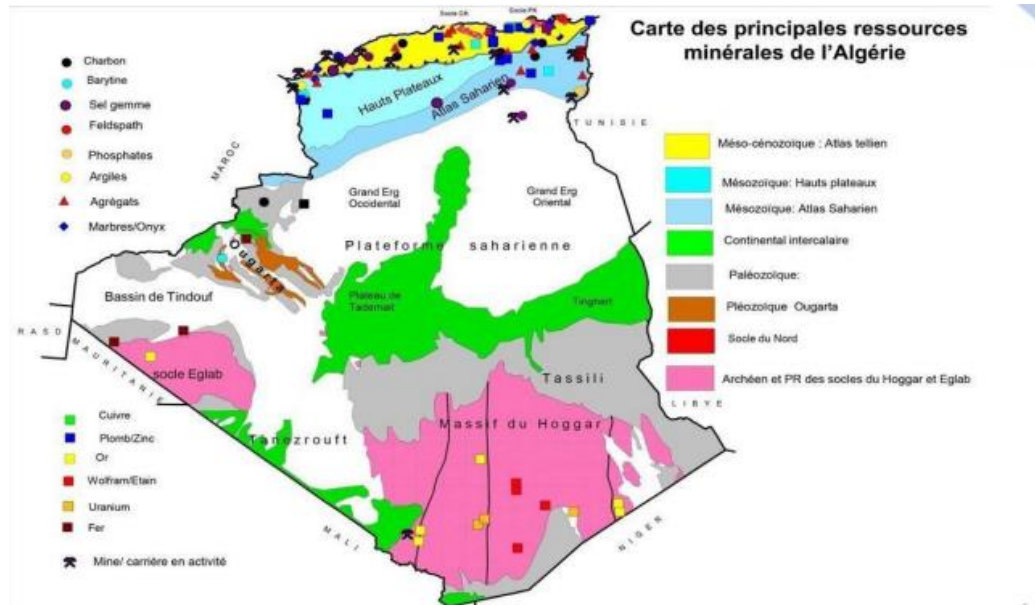


Figure 1.7 : Carte des principales ressources minérales d'Algérie [10]



Figure 1.8 : Échantillons des principales variétés de marbres algériens.

Tableau 1.2 : Principaux gisements de marbre en Algérie et leurs caractéristiques mécaniques et esthétiques [10].

Wilaya	Gisement / Site	Typologie Lithologique	Spécificités Chromatiques	Importance Économique
Skikda	Massif de Filfila	Marbre calcique à saccharoïde	Blanc pur, gris, réséda	Majeure (Pôle leader national)
Guelma	Djebel Mahouna	Marbre compact	Gris, gris-bleuté	Très importante (Approvisionnement BTP)
Tlemcen	Ouled Mimoun	Calcaire recristallisé (Onyx)	Translucide, rubané (jaune/brun)	Unique (Forte valeur à l'exportation)
Tamanrasset	Massif du Hoggar	Granitoides et Marbres	Noir, vert, rose	Potentiel colossal (Gisements massifs)
Oran	Kristel	Brèche marbrière	Rouge prédominant, faciès bréchique	Haute valeur ornementale

Analyse et positionnement technico-économique

L'examen synthétique du Tableau 1.2 montre la grande diversité lithologique et esthétique du patrimoine marbrier algérien. La région orientale du pays, portée par les complexes extractifs de Skikda (Filfila) et de Guelma (Mahouna), s'impose comme le cœur névralgique de cette industrie grâce à ses faciès blancs et gris de haute qualité. Parallèlement, des occurrences géologiques uniques comme l'onyx de Tlemcen (souvent qualifié à tort d'agate en raison de son aspect rubané) et les granits du Hoggar confèrent à l'Algérie des arguments compétitifs majeurs pour se positionner sur les segments internationaux de prestige.

Cependant, face à l'hégémonie commerciale de la Chine et à la maturité technologique de pays comme la Turquie ou l'Italie, l'appareil extractif national fait face à un impératif de modernisation. L'augmentation des rendements de blocs marchands "sans défauts" (fissures ou micro-fractures induites) dépend directement de l'abandon progressif des méthodes d'abattage conventionnelles et agressives au profit de techniques de découpe à faible impact mécanique.

C'est dans ce contexte de transition technologique que s'inscrit la présente étude. L'optimisation des paramètres opératoires du sciage au fil diamanté devient un levier incontournable. Elle permet d'accroître la vitesse de production, de minimiser les pertes de matière première en carrière sous forme de fines, et de garantir l'intégrité structurale des blocs de marbre algériens avant leur traitement en usine de façonnage.

1.2.3 À l'échelle locale : l'unité de production de Filfila (Skikda)

L'unité d'extraction du massif de Filfila, située dans la wilaya de Skikda, représente le site le plus stratégique du patrimoine marbrier algérien pour la production de blocs marchands. Historiquement exploité via des méthodes conventionnelles d'abattage par gradins, ce gisement fait l'objet d'une transition technologique majeure.

Afin de répondre aux exigences de rentabilité et de préserver l'intégrité de la ressource, l'exploitant généralise progressivement l'usage du découpage au fil diamanté. Cette méthode d'abattage primaire et secondaire permet non seulement d'obtenir des blocs de géométrie régulière (équarrissage optimal), mais elle réduit également de manière drastique le taux de déchets (fines et stériles de fragmentation) par rapport aux anciens procédés à l'explosif ou par coinçage mécanique (voir figure 1.8). [11]



Figure 1.9 : Bloc monolithique de marbre blanc extrait par découpe au fil diamanté – Site de Filfila (Cliché personnel, 03 février 2026).

1.3 CADRE GÉOGRAPHIQUE ET ADMINISTRATIVE

1.3.1 Localisation et Infrastructures du site de Filfila

Géographiquement, la carrière de Filfila se situe dans la zone septentrionale de l'Algérie (Feuille n°15). Elle est localisée à environ 25 km à l'est de la ville de Skikda et à 530 km d'Alger. Sur le plan administratif, le site d'extraction relève entièrement de la commune de Filfila.

- ✓ **Sur le terrain**, l'affleurement marbrier suit la crête de Filfila avec une largeur variant entre 200 et 300 m. **Les limites naturelles du site sont claires** : la mer Méditerranée au nord et le chemin de communication n°12 au sud. Enfin, la carrière bénéficie d'une situation stratégique grâce au réseau routier (CGC n°18) et à la disponibilité immédiate des ressources énergétiques (eau, gaz et électricité), comme l'illustre la vue satellitaire ci-dessous

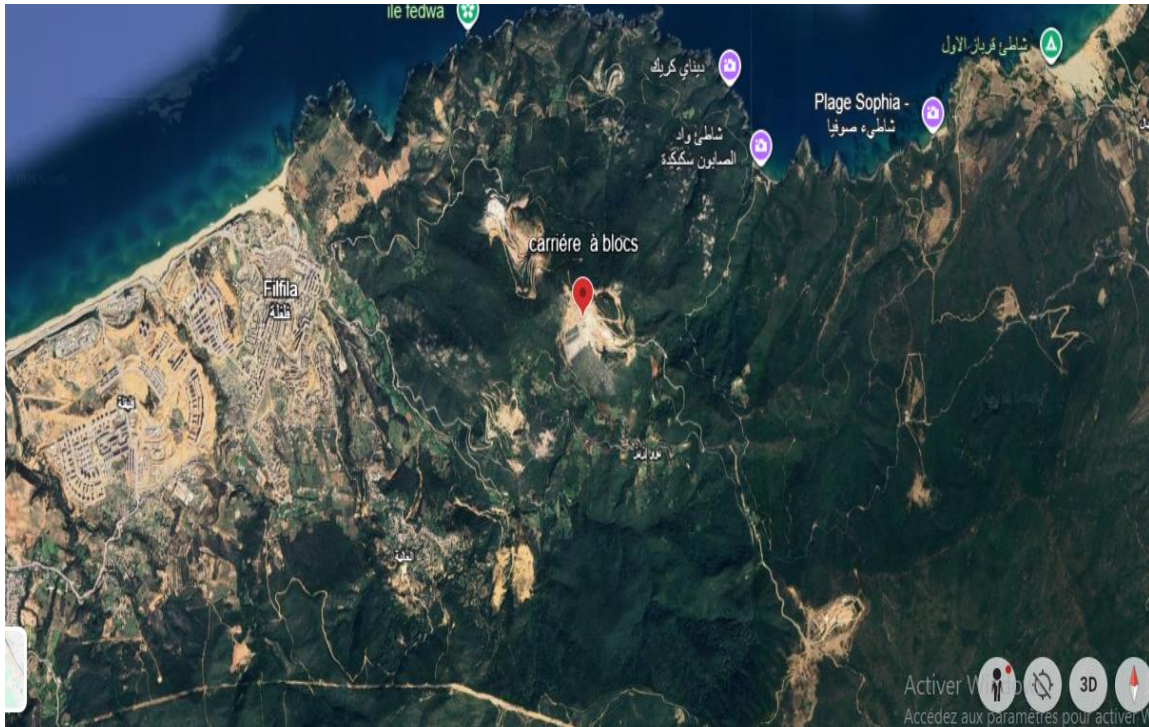


Figure 1.10 : Vue satellitaire de la situation géographique (Source : Google Earth, 20/04/2026)

1.3.2 Géomorphologie, orographie, végétation, climat

Concernant l'aspect physique du site, le relief se distingue par une morphologie montagneuse assez accidentée, où s'alternent vallées profondes et sommets arrondis. Dans les zones d'affleurement, on observe un paysage karstique typique avec des collines rocheuses. Il faut noter que l'exploitation actuelle se situe près de la ligne de partage des eaux, à des altitudes allant de 500 à 655 m. Les dénivelés au sein du massif marbrier oscillent entre 50 et 150 m (voir annexes photos n° 01 à 05).

Au niveau de la couverture végétale, le secteur est dominé par des broussailles et des forêts de chênes-lièges. Cependant, à l'intérieur même de la carrière, cette végétation est quasi inexistante, sauf sur les bordures est et nord. Pour ce qui est de l'hydrologie, le drainage naturel se fait vers le nord, où les eaux de surface sont évacuées vers la mer Méditerranée.

Enfin, le climat de la région est typiquement méditerranéen. Les précipitations sont assez importantes, dépassant les 800 mm/an sur les sommets. Nous avons également relevé des écarts

de température significatifs, allant de 9°C en hiver à plus de 35°C en été, des conditions climatiques qui influencent directement le rythme de travail sur le chantier [12]

1.3.3 Historique des travaux

Les études géologiques de la région du gisement ont été entamées dans la deuxième moitié du XIX^e siècle, mais les études les plus détaillées ont été réalisées au cours des travaux du levé géologique en 1969 effectué par l'équipe des géologues soviétiques avec V.D. Chkhovitch.

Les résultats des travaux sont exposés dans la notice explicative de la feuille N°15 de la carte géologique de Fil-Fila à l'échelle 1/50 000. On note que l'échelle des travaux n'a pas permis de déchiffrer la structure interne des marbres et de déterminer leurs rapports avec les roches encaissantes.

Sur le gisement de Fil-Fila les études géologiques ont été effectuées en 1967 par l'équipe des géologues égyptiens. Les résultats des travaux sont présentés dans le rapport (le marbre du Djebel Fil-Fila, étude géologique, auteur M.S.Afia). Sur la base des études géologiques des carrières et des affleurements (les travaux miniers et de forage n'ont pas été réalisés) cette équipe a établi le schéma de répartition des affleurements des marbres au 1/5000, la carte géologique du site. Ils ont distingué sept (07) variétés de marbres et ont calculé leurs réserves.

En 1971-72, l'équipe des géologues romains a réalisé les travaux d'évaluation avec calcul des réserves en catégories industrielles. Les résultats des travaux sont exposés dans le rapport recherche marbre, pierres décoratives. Études géologiques du gisement de Fil-Fila, 1972. Au cours de ces études géologiques sur le gisement il a été réalisé les types et les volumes des travaux suivant :

- Levé topographique 1/500 (0,2 km²)
- Forage carottant 10 sondages.
- Prélèvement des monolithes (18 éch).
- Prélèvement des échantillons de carotte (41 éch).
- Etudes technologiques (441 éch).

Sur la base de ces études susmentionnées un calcul des réserves a été fait en catégories :
B = 565 000 m³ et C₁ = 1862 000 m³.

Par analogie des géologues égyptiens, les sept (07) variétés des marbres suivant tout le massif ont été confirmées avec détermination de leurs quantités dans le volume global des réserves. Les caractéristiques de la composition chimique et des propriétés physico-mécaniques des marbres sont données.

Les défauts majeurs de ces travaux étaient les suivants :

1. L'emplacement des sondages d'évaluations sans études géophysiques.
2. La profondeur non documentée de 15 à 82 m.
3. Les limites géologiques du gisement n'ont pas été mises en évidence, ainsi que le caractère du contact des marbres avec les roches encaissantes et leur position dans l'espace, n'ont pas été déterminés.
4. Les propriétés techno-géologiques des roches encaissantes n'ont pas été étudiées.
5. La profondeur des marbres n'a pas été étudiée [12].

1.4 GEOLOGIE REGIONALE

1.4.1 Stratigraphie :

La région d'étude fait partie de la zone plissée alpine de l'Afrique du Nord.

La partie ouest de la région est représentée par la série du paléozoïque inférieur qui chevauche le jurassique et le crétacé, ainsi que les granites du miocène.

La partie centrale et est de la feuille est caractérisée par la dépression de Guerbez - Boumaiza représentée par le paléozoïque recouvert par le quaternaire.

A l'extrême nord-est de la feuille, elle est représentée par la nappe numidienne.

Les unités stratigraphiques seront traitées dans le cadre des ensembles structuraux énumérés ci-dessous. Ces derniers sont vraisemblablement les formations de différentes zones structuro-faciales, tectoniquement rapprochées. [12]

✓ **Ensemble post-nappe**

Il comprend les terrains Pliocène et quaternaire formant les structures post- nappes surimposées.

✓ **Quaternaire**

Les terrains quaternaires développés dans la région se subdivisent en plusieurs types génétiques : marin, éolien, alluvionnaire et les terrains de pentes,

✓ **Rharbien Q ⁶**

Ils peuvent être alluvionnaires, marins éoliens et éboulis de pentes.

Les sédiments marins forment une bande étroite composée de plages et sont constitués essentiellement de sables carbonatés.

Les sédiments les plus répandus sont les alluvions actuelles des lits de cours d'eau et les alluvions formant les plaines côtières.

✓ **Soltanien et Ouldjien Q ⁵**

Il comprend deux types génétiques de sédiments étroitement liés, ce sont les sables cimentés des plages marines et les sables remaniés. Les sables de dunes occupent une plus grande superficie, ils sont développés surtout sur le rivage, dans la partie nord-ouest de la feuille.

✓ **Messaoudien Q ²**

Aux sédiments du Massaoudien doivent être rapportées vraisemblablement les formations du hautes terrasses marines, les sédiments des terrasses marines forment des

surfaces plates, légèrement ondulées, recouvrant les roches du paléozoïque inférieur. Ils sont représentés par de gros galets, fragments et blocs.

✓ **Plaisancien n⁸**

Sur le territoire de la feuille il n'apparaît à la surface qu'au nord-ouest du terrain d'étude, où il est représenté par des marnes blanches. En outre, il a été reconnu par des sondages dans l'amont de l'Oued Righa où des marnes gris-marine reposent sous une couverture quaternaire.

✓ **Nappe numidienne**

Elle correspond à des formations bien connues sur tout le territoire de l'Algérie du nord et se caractérise par des particularités faciales peu connues, le numidien occupe la position la plus haute dans le plan structural, il se subdivise en deux assises : inférieure essentiellement argileuse et supérieure à prédominance de grès quartzeux.

✓ **Assise supérieure (e^{3b}) Grès**

Elle est essentiellement constituée de roches de grès quartzeux, moyens à grossiers, grossièrement lités, les grains de quartz sont d'habitude bien roulés.

Les grès renferment aussi une proportion subordonnée de grains détritiques de feldspath, mica, glauconie, tourmaline, minéraux métallifères.

✓ **Assise inférieure (e^{3a}) Argiles**

Elle est essentiellement constituée de roches argileuses, son extension est fort limitée sur le territoire de l'étude (versant ouest de Koudiat. Terrara).

✓ **Nappe de flysch sénonien à microbrèches**

Elle comprend les terrains très particuliers du céno-manien et du sénonien dont les faciès se distinguent par des sédiments contemporains de l'unité de la Marsa. Leur zone d'extension

est localisée, dans le plan structural. Les formations de l'ensemble en question se trouvent au-dessus de celles de la Marsa et sont presque toujours renversées.

✓ **Sénonien K⁶**

Il se trouve stratigraphiquement au-dessus du sénonien-turonien, il est représenté par une assise finement litée dans laquelle alterne les argilites, marnes argileuse et mésobrèches, la zone d'extension de ces terrains dans les limites du territoire de l'étude est circonscrite à de petites étendues localisées dans la région de Kat Ben Hadeb et probablement dans celles de Koudiat Djebana où il est pratiquement impossible de différencier le cénomanien du sénonien.

✓ **Cénomano-Turonien K¹⁻²**

Elle est l'assise la plus ancienne comme dans la nappe du flysch à microbrèche, elle est représentée par des phthanites, des argilites siliceuses et des argilites banales d'une puissance apparente réduite et d'une extension très limitée. Ces roches forment d'habitude les écailles tectoniques à la base du Numidien.

✓ **Unité de la Marsa**

Cette unité a été distinguée lors des travaux menés au Cap de fer (Vila, inédit) sur le territoire de l'étude, nous avons affaire seulement à la moitié supérieure de la coupe qui correspond en gros au stratotype du complexe du Penthivère (Vila, Naumann, 1967). Les formations rapportées à l'unité de la Marsa, sont développées dans le nord-est du territoire. Elle comprend les terrains localement répandus de l'aptien-albien et la coupe pratiquement continue du sénonien à l'oligocène y compris.

✓ **Oligocène e⁸⁻⁹**

Il est constitué par une puissante assise de grès micacés qui repose avec passage graduel sur les terrains de l'éocène supérieur et occupe de grande étendue dans la partie nord-est de la région, la limite entre l'assise à prédominance de microbrèches rougeâtre et la série des grès micacés est marquée arbitrairement par l'apparition de puissant niveau de grès micacés à grains moyens.

Dans la coupe les grès micacés s'intercalent avec les argilites communes et marneuse, dans les grès prédominant : quartz, séricite, muscovite et petits fragments de schistes.

✓ Eocène supérieur e⁷

On lui attribue une assise relativement puissante de microbrèches concordantes sur les terrains mentionnés dans l'éocène inférieur et moyen. Néanmoins, ces deux unités sont séparées par une limite lithologique assez nette.

✓ Eocène inférieur et moyen e⁴⁻⁵

Les terrains qui le composent poursuivent sans interruption la coupe de sénonien et du paléocène, lithologiquement ils sont très proches des roches du paléocène et sont eux aussi représentés par des microbrèches et mésobrèches intercalées d'argilites et de calcaires gréseux, plus haut apparaissent des lentilles et niveaux de brèches carbonatés à *Nummulites* aussi qu'une série d'argilites rouge cerise attribuée déjà au sommet du lutétien, la puissance de l'éocène inférieur et moyen ne dépasse pas 70-80 m.

✓ Sénonien et paléocène k⁶- e¹

A la base de cette coupe apparaissent des grès calcaires hétéro-granulés intercalés des grès graveleux à gros grains de quartz bien roulé, de mésobrèches et de brèches conglomératiques. Dans les fragments de ces derniers prédominent les roches siliceuses, les calcaires fines, moins souvent les dolomies. Les microbrèches et brèches apparaissent plus haut renferment de bancs des calcaires gréseux *Microcedium* caractéristique du paléocène.

✓ Aptien Albien b⁵⁻⁶

Les terrains de l'aptien albien poursuivent sans interruption la coupe du Tithonique. Le néocomien sur le territoire de l'étude, ils forment de petits champs aux contacts tectoniques avec les formations encaissantes. Dans la coupe prédominent les gris fins, gris ou brunâtres,

jaunâtre en surface altérée forment des séries puissantes de 4 à 6 m intercalées de bancs décimétriques (0.2-0.5 m) d'argilite.

1.4.2 Ensemble allochtone kabyle

✓ Oligocène e⁸⁻⁹

Il est transgressif, avec une discordance angulaire apparente, sur les terrains du paléozoïque inférieur c'est une assise de type de molasse qui est relativement bien développée dans la partie centrale, où elle surmonte partout les terrains métamorphiques du paléozoïque inférieur.

A la base, on trouve presque partout une assise des poudingues et des brèches sédimentaires, dont le matériel détritique est essentiellement constitué de schistes métamorphiques avec les quels est associé de quartz laiteux.

Les poudingues et brèches conglomératiques sont d'habitude mal calibrés, représenté avec des gros blocs et galets de roches métamorphiques.

✓ Permo trias P-T

Les terrains de cet âge forment des étendues très restreintes dans la vallée de l'Oued Ksab, ils sont représentés par des grès rouges grossières et des conglomérats est à dominance de quartz laiteux, moins souvent se sont des fragments de quartzites fins à micacés à moscovite, des roches siliceuses à radiolaires et des microgranites inconnus dans la région de l'étude.

✓ Paléozoïque

Les terrains de cet âge occupent des étendues considérables dans la partie sud-ouest de la feuille de Fil-Fila (30 Km environ). Ils s'étirent plus loin sous forme des bandes étroites longeant la côte jusqu'à l'embouchure de l'Oued Messenger et apparaissent également dans la région de la forêt de Sanhadja : au nord du Djebel Safia.

Les terrains du paléozoïque inférieur se subdivisent en deux assises a lithologie différente, entre les quelles la limite est plutôt arbitraire.

✓ **Assises supérieure ε^{2-3}**

Poursuit la coupe de l'assise inférieure sans lacune apparente par rapport à celle ci, elle se distingue par une plus grande diversité lithologique de ces roches, elle est constituée par des séricitoschistes (à quartz séricite) et des chloritoschistes sériciteux analogues, ainsi que par des phyllades de teinte verdâtre, des bancs de grès métamorphiques et des lits relativement rares de roches métavolcaniques.

Du point de vue pétrographique, les phyllades sont des roches composées d'écailles de chlorites dans les quelles sont régulièrement distribués de menus grains anguleux de quartz, avec quelques fois de grosses lamelles et Moscovites.

Les minéraux accessoires sont : apatite, tourmaline, zircon.

Les grès métamorphiques sont constitués de petits grains de quartz et de plagioclase acide, mal roulés, ainsi que de séricite abondante aux feuillets orientés.

✓ **Assise inférieure ε^{1-2}**

Les roches de cette assise occupent la partie nord du territoire constituée par les terrains du paléozoïque inférieur au nord du Djebel Ali Bou Ekfa, dans la région de Kef Dorba et dans tous les bassins de l'Oued Soubane la base de la coupe n'est pas connue en affleurement, ce sont en général des séricitoschistes et chloritoschistes sériciteux gris, gris bleuâtre, à schistosité très accusée et souvent à plicatulations. L'assise inférieure renferme aussi les lentilles et parfois des petits lits de quartzite brunâtres [12]

1.5 GEOLOGIE LOCALE

Dans la structure géologique du gisement de marbre de Fil-Fila on note les marbres et les calcaires marmorisés du lias et les roches de contact représentées par les cornéennes de différente composition formées dans les roches calcaréo-argileuses du jurassique moyen-néocomien. La substance utile est représentée par l'assise des marbres formant un grand corps lenticulaire observé du sud-ouest au nord-est sur une étendue de 1100 m avec 300 m de large.

Les géologues prédécesseurs ont distingué dans les marbres sept variétés de couleur : blanche ; gris-clair ; grise ; noire ; jaune ; bleue et rose.

Les résultats de nos travaux ont permis de distinguer sur le territoire du gisement les variétés suivantes : blanche ; gris-clair ; gris foncé ; réséda et bleue [13]

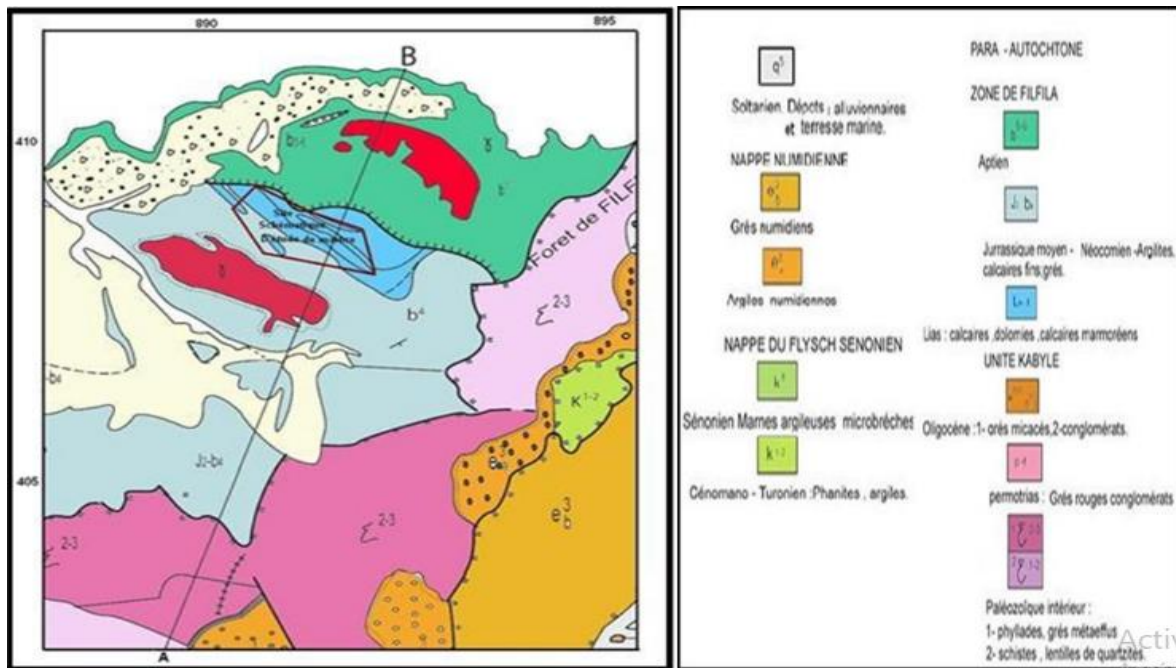


Figure 1.11 : Carte géologique simplifiée du massif de Fil-Fila et ses unités limitrophes [13]

1.5.1 Stratigraphie

Le territoire du gisement des marbres de Fil-Fila se divise en trois unités tectoniques superposées du nord-ouest au sud-est :

1. Unité inférieure (secteur nord-est)
2. Unité moyenne (secteur centrale)
3. Unité supérieure (secteur sud)

Ces trois complexes (ou unités) sont partagés par de grands contacts tectoniques représentés par les brèches et les zones de microbrèches [13].

1.5.2 Complexe inférieur

Les affleurements de ce complexe s'observent sur la pente ouest du mont Fil-Fila au-dessous de la côte + 450, ainsi que sur la plaine de la partie nord de la carrière. Ici il a été mis en évidence la succession lithologique suivante :

Les marbres microcristallins à puissance atteignant 40 m reposant sur les schistes marno-argileuse noires à filon de quartz, d'hématite et de sidérite. Dans la partie supérieure ces marbres ont la teinte rosâtre.

Plus loin on note les conglomérats à puissance de 0,5 m qui sont constitués par les marbres blancs, à gros grains, fissurés. Les fissures sont remplies par l'argile verdâtre.

Au-dessus des conglomérats on note les marbres dolomitisés, gris clair avec les fissures remplies par la calcite. Leur puissance est de 5 à 7 m.

Plus haut suivant la coupe on note la succession des marbres noirs bitumineux et gris foncé finement cristallins. Leur puissance fait 2,0 à 4,5 m.

Plus haut les marbres sont blancs, saccharoïdes et massifs. Les variétés blanches se substituent par celles de couleur gris-clair. Habituellement ce sont des roches à structure finement cristalline avec la teneur en calcite de 95 à 98%.

Dans la partie nord de la carrière on note les affleurements des marbres blancs homogranulaires dont la composition minéralogique est quasi-monominérale avec la teneur en calcite atteignant 99%.

Du point de vue structural ce complexe représente un monoclinal à direction nord-est et sud-ouest. La structure détaillée est assez complexe, elle est composée des écaillés chevauchant du sud-est au nord-ouest. Sur le flanc ouest de la carrière de Filfila on note les plis charriés à pendage du sud-est au nord-ouest qui reproduisent les faisceaux lithologiques le long des fissures.

Les accidents ayant la direction nord-est et sud-ouest ont eu lieu lors de la formation des plis et ils ont été fixés par les fissures tectoniques, les filons de calcite et les zones de Skarns à actinote.

Les accidents tectoniques récents sont représentés par les fissures remplies de calcite ou d'argile résiduelle. Les calcaires cristallins de cette unité sont représentés par les marbres blancs, gris clair, gris foncé et rosâtres.

1.5.3 Complexe moyen

Ce complexe est situé dans la partie nord-ouest de la carrière et englobe les faisceaux lithologiques suivants [13] :

- Skarns à actinolite à la base ;
- Marbres cristallins blancs dans la partie moyenne ;
- Argiles marneuses avec les lentilles de calcaires verts dans la partie supérieure.

1.5.4 Skarns à actinolite à la base

Ils affleurent en bandes de 0,5 à 10 m de large. Du point de vue lithologique les roches sont constituées par les marbres blancs et gris clair. Les marbres sont fortement accidentés dans les noyaux des plis et ils passent aux Skarns à actinolite suivant les plans de schistosités. Dans les zones de fissuration on note les veinules de quartz, de pyrite et de quartzite. Les Skarns représentent une brèche tectonique qui est notée au contact tectonique entre les unités moyennes et inférieure, orienté du nord-est au sud-ouest avec le pendage sud-ouest sous l'angle de 20 à 30°. Leur puissance varie de 0,5 à 35 m. dans les Skarns on note les zones de la calcite gris-bleu. Les Skarns sont généralement massifs, parfois schisteuse avec la composition lithologique instable. [13].

1.5.5 Marbres cristallins

Il y a deux catégories de roches :

- ✓ Marbres gris clair ;
- ✓ Marbres blancs

1.5.6 Marbres gris clair

Les roches sont constituées par les marbres cristallins à taches gris foncé. La puissance de ces couches est de 1 à 2 m. Le litage se présente par les bancs dolomitiques à puissance de 0,2 à 0,7 m. Dans les marbres on note les imprégnations de pyrite et de mica qui s'observent le long des fissures et suivant la stratification. La teinture grisâtre est due à cette imprégnation. Ces marbres ont été formés à la suite du dynamométamorphisme des roches sédimentaires primaires dans notre cas des calcaires. Leur puissance atteint 40 m.

1.5.7 Marbres blancs

Ces marbres sont représentés par les roches de même type suivant toute l'épaisseur. Ce sont les marbres blancs microcristallins. On rencontre parfois les lentilles des dolomies. La roche est massive, légèrement litée. La puissance des couches est de 0,5 à 1,5m. Le faisceau des marbres a un pendage sud où il est recouvert par les roches de l'unité supérieure et vers l'est par les argiles marneuses.

1.5.8 Argiles marneuses

L'affleurement de ces roches est noté dans la partie est. Il est représenté par l'alternance des schistes marno-argileux séricitisés partiellement par les calcaires marneuse et grès. Dans les limites de cette alternance on note le développement des lentilles de calcaires cristallins partiellement silicifiés, de couleur vert claire. La couleur verte est due à la présence des imprégnations de mica dans les calcaires.

1.5.9 Complexe supérieur

Dans ce complexe on note les faisceaux suivants :

- Marbres microcristallins gris-bleu à la base ;
- Marbres microcristallins blancs dans la partie moyenne ;
- Marbres gris blanchâtre dans la partie supérieure.

Le contact entre les complexes supérieur et moyen se trouve le long de la faille inverse, celui du complexe inférieur est situé sur le plan de chevauchement à pendage est sous l'angle de 40° à 60°.

1.5.10 Dépôts du quaternaire

Dans la région en question ces dépôts sont représentés par les colluvions et les argiles résiduelles. Les colluvions sont notées à l'est, sur les limites des marbres avec les argiles marneuses. Ce sont les calcaires marneux et les marbres cristallins cimentés par l'argile.

Les argiles résiduelles sont de couleur brun rougeâtre. Ces argiles remplissent fréquemment les fissures des calcaires.

Les argiles sont recoupées par les sondages NN°14 ; 15 ; 17 ; 19 ; 20 ; 22 ; 23 et elles représentent les roches de découverte du gisement. Leur puissance varie de 0,2m (Sond.14) à 15,2m (Sond.20). [13].

1.6 Tectonique

Comme il a été déjà mentionné le gisement des marbres de Fil-Fila est attribué à l'unité para-autochtone qui recouvre en nappe tectonique plusieurs unités.

Ces structures ont été vérifiées au cours des travaux effectués par la mission roumaine (1971-1972) et précisées par notre équipe à la suite des travaux réalisés.

La structure du gisement est monoclinale à direction nord-est et sud-est, à pendage nord-est ou est sous l'angle de 20 – 40°. Le gisement est affecté par les accidents disjonctifs. Ces accidents sont concordants et transversaux par rapport à l'orientation générale du massif des marbres. La plupart des accidents ont le pendage abrupt et le long de ces accidents on note la bréchification des marbres et le développement des filons de calcite. Le long des cassures on note les cavités karstiques de petites dimensions.

La structure détaillée mise en évidence par les sondages d'évaluation englobe quelques blocs caractérisant la tectonique de la région.

Les blocs para-autochtones des formations mésozoïques sont représentés par les écailles tectoniques qui font partie de la structure géologique. [14]

Il est noté trois écailles tectoniques superposées

- 1- Ecaille inférieure (correspondant à l'unité inférieure)
- 2- Ecaille moyenne (correspondant à l'unité moyenne)
- 3- Ecaille supérieure (correspondant à l'unité supérieure).

1.6.1 Ecaille inférieure

Cette structure représente un synclinal asymétrique s'étendant dans la direction nord-est et sud-ouest avec le pendage ouest. Son flanc est pratiquement écrasé, le flanc ouest de la structure repose sur les argiles et les marnes du crétacé. La terminaison nord-est et sud-ouest et au sud-est elle est affectée par les fissures transversales. [14]

1.6.2 Écaille moyenne

Cette structure représente également un synclinal asymétrique qui est écrasé sur le flanc renversé du pli et chevauché sur l'écaille supérieure, la direction du flanc normal du pli est nord-est et sud-ouest avec le pendage de 20° à 40° vers le sud-est à la base de ce pli on

note une zone puissante de brèches suivant laquelle il y a eu lieu d'un glissement. Outre cela, le flanc normal du pli est compliqué par une faille parallèle.

Les schistes sont affectés par l'accident tectonique au nord et à l'ouest par l'écaille moyenne est chevauchée sur l'écaille inférieure et vers le sud elle recouvre tectoniquement les formations de l'écaille supérieure.

Dans cette structure géologique on note le développement des structures secondaires, mais pour les raisons d'absence des niveaux lithologiques ces dernières s'observent difficilement et parfois il est impossible de les suivre.

Les accidents tectoniques sont mis en évidence suivant les cassures remplies par le karst. [14]

1.6.3 Écaille supérieure

Cette structure représente un pli tectoniquement écrasé. Le flanc de ce pli a une direction nord-est et sud-ouest avec le pendage des couches sous l'angle de 20°-30° dans la direction sud-est et est. Le contact de cette structure avec les autres écailles est tectonique. A l'est ce contact est recouvert par les éboulements de la carrière. Dans les limites de l'écaille supérieure on note les secteurs des dolomies qui sont liées plutôt avec les fissures parallèles par rapport au plan du chevauchement. [14]

CONCLUSION

En conclusion, il ressort de ce premier chapitre que le marbre est bien plus qu'une simple roche ornementale ; c'est une ressource stratégique alliant prestige historique et propriétés techniques rigoureuses. La compréhension de ce matériau et de son contexte géologique, en particulier au niveau du gisement de Filfila, constitue une étape cruciale pour tout ingénieur des mines soucieux d'optimiser l'exploitation.

Toutefois, la valorisation de ce patrimoine naturel dépend intrinsèquement de la précision des méthodes d'extraction utilisées. Afin de relever les défis liés à la productivité et à la qualité des blocs, il est indispensable de maîtriser les technologies de découpe les plus performantes. C'est

CHAPITRE 1

dans cette optique que le chapitre suivant sera consacré à l'étude approfondie du **sciage au fil diamanté**, une technique révolutionnaire qui redéfinit aujourd'hui les standards de l'industrie marbrière.

CHAPITRE 2

PRÉSENTATION DU SITE D'ÉTUDE

ET MÉTHODOLOGIE

EXPÉRIMENTALE

INTRODUCTION

Ce deuxième chapitre établit le lien fondamental entre les concepts théoriques et les réalités opérationnelles du terrain à travers une analyse détaillée de l'unité d'exploitation de Filfila (Skikda), affiliée à l'entreprise nationale ENAMARBRE. L'optimisation des paramètres du sciage au fil diamanté ne peut s'affranchir d'une confrontation directe avec les conditions réelles et contraignantes du massif rocheux. La démarche adoptée ici vise à ancrer l'étude dans un cadre pratique et appliqué, en s'appuyant sur les spécificités quotidiennes du site extractif.

Dans les sections qui suivent, l'environnement géotechnique du gisement — réputé pour la haute qualité de ses faciès de marbres blancs et gris — sera rigoureusement décrit, parallèlement aux caractéristiques techniques des équipements en place, notamment la machine de découpe **Gamma 875**. L'analyse critique de la méthode d'exploitation par gradins droits permettra d'identifier les contraintes structurelles et cinématiques des pratiques actuelles d'extraction.

Cette étape de caractérisation s'avère indispensable : les données brutes, issues des observations et des campagnes de mesures directes menées sur le site, constituent le socle de notre démarche méthodologique. C'est la fiabilité de cette base de données réelles qui garantira la validité pratique et la transférabilité industrielle des modèles d'optimisation mathématique développés par la suite.

2.1 Présentation de l'Entreprise Nationale de Marbre (ENAMARBRE)

L'Entreprise Nationale de Marbre, par abréviation « ENAMARBRE », est une Entreprise Publique Économique (EPE) constituée sous la forme d'une Société Par Actions (SPA) au capital de 345.000.000 DA. Elle est issue de la restructuration de la Société Nationale de Recherche et d'Exploitation Minière (SONAREM) opérée en juillet 1983. En 1991, l'entreprise a connu une mutation structurelle pour devenir une SPA, s'affirmant ainsi comme le leader national de l'extraction et du façonnage des roches ornementales.

L'entreprise déploie ses activités à travers un réseau de sept (07) unités opérationnelles, dont l'unité de Filfila (Skikda) qui constitue le site majeur d'extraction de blocs de marbre brut. Ses missions principales englobent l'exploitation des gisements, la transformation industrielle

(sciage et polissage), le concassage des dérivés ainsi que la commercialisation des produits finis tels que les dalles, les carreaux et la poudre de marbre. [3]

2.1.1 Les Unités Opérationnelles d'ENAMARBRE :

Elle comprend (7) unités fondamentales.

Unité de Filfila (Skikda) : C'est le site sur lequel nous menons notre étude (carrière de marbre en blocs).

- Unité de CHATT (Skikda) : Située près de Filfila elle est spécialisée dans les dérivés du marbre (Carrière de dérivés de marbre), tels que les graviers et la poudre.
- Unité de MAHOUNA (Guelma)
- Unité d'AIN SMARA (Constantine)
- Unité de MEKLA (Tizi Ouzou)
- Unité de KRISTEL (Oran) :
- Unité de HONAINA (Tlemcen) [3]

○ Outre les usines de transformation :

En plus des sept carrières, la société possède des usines destinées à transformer ces blocs en dalles et panneaux prêts à l'emploi :

Usine de Skikda : (usine de transformation de Skikda).

Usine de Boumahra (Guelma) : (usine de Boumahra près de Guelma) [14]

2.2. Description de l'unité de production de Filfila

2.2.1. Historique de l'unité

L'exploitation du marbre dans la région de Filfila remonte à l'époque antique, mais son développement industriel moderne a véritablement débuté durant la période coloniale. Après l'indépendance de l'Algérie, l'État a pris en charge la gestion du gisement pour en faire un levier économique national.

Les jalons historiques les plus importants de l'unité sont :

- **Années 1970** : Début d'une exploitation plus structurée sous l'égide de la **SONAREM** (Société Nationale de Recherche et d'Exploitation Minière), avec l'introduction des premières méthodes mécanisées.
- **16 Juillet 1983** : Suite à la restructuration de la SONAREM, l'unité de Filfila est rattachée à l'entreprise nouvellement créée, **ENAMARBRE**. C'est à partir de cette date que l'unité a commencé à moderniser ses schémas d'extraction.
- **Mars 1991** : Passage de l'entreprise au statut de **SPA** (Société Par Actions), ce qui a permis une plus grande autonomie de gestion et l'acquisition d'équipements de découpe plus performants.
- **Années 2000 à aujourd'hui** : Introduction massive de la technologie du **sciage au fil diamanté**, remplaçant progressivement les méthodes traditionnelles (comme le fil hélicoïdal ou le sautage contrôlé) pour minimiser les pertes et améliorer la qualité des blocs extraits.

Aujourd'hui, l'unité de Filfila est considérée comme le site le plus stratégique d'ENAMARBRE, fournissant la majorité des blocs de marbre blanc destinés à la transformation et à l'exportation.

[14]



Figure 2.1 : Vue aérienne de la carrière de Filfila montrant le front de taille et la disposition des gradins (Source : Google Earth, 10/04/2026)

2.2.2 Capacités et indicateurs de production de l'unité de Filfila

L'unité de Filfila constitue le pôle majeur de production d'ENAMARBRE, répondant à une demande croissante sur les marchés national et international. La performance globale de ce site est intrinsèquement liée à l'efficacité des techniques d'extraction appliquées notamment le sciage au fil diamanté ainsi qu'à la gestion optimisée des fronts de taille.

Le tableau ci-dessous présente les indicateurs clés de la production brute et nette, ainsi que l'état des réserves pour les années 2023 et 2024. Ces données illustrent l'évolution du rendement et de la capacité opérationnelle du gisement [14] :

Tableau 2.1: Indicateurs de production et état des réserves (2023-2024)

Indicateurs	Année 2023	Année 2024
Production annuelle brute	27063 (m ³)	38200.00 (m3)
Production annuelle nette	8973(m ³)	30844.00(m3)
Réserves estimées	1928760.53(m3)	/

2.3 Procédure de gestion de la production de blocs de marbre

Les procédures de gestion de la production de blocs de marbre définissent les conditions à respecter pour produire des blocs de marbre conformes aux normes de qualité en vigueur, tout en assurant une utilisation rationnelle des ressources humaines et matérielles et une application rigoureuse des règles de sécurité. La gestion de la production des blocs comprend plusieurs aspects d'une grande importance, tels que la méthodologie d'exploitation, la qualité du produit, le calcul de la production, et le développement [15]

2.3.1 Méthode d'Exploitation

Plusieurs méthodes sont utilisées dans l'exploitation des Carrières à Blocs. Ces méthodes dépendent de l'importance des Carrières et de la configuration du gisement de marbre. On peut retenir deux (02) méthodes d'exploitation:

2.3.2 Cas d'utilisation de l'haveuse :

L'haveuse permet de créer un front de percée qui permettra d'exploiter les fronts qui. Ils seront créés de part et d'autre de ce front d'attaque. Les fronts qui seront exploités par la foreuse doivent présenter des dimensions optimales.

Le front de percée créé par la foreuse permettra de développer une exploitation de type

« en damier » grâce à la combinaison du forage horizontal et de la coupe verticale à l'aide de machines diamantées. [16]



Figure 2.2 : Haveuse à chaîne en opération sur le front de taille – Unité d'exploitation de Filfila (Cliché personnel, 14 février 2026).

Régime de travail de la haveuse :

L'ensemble de la haveuse se déplace sur des rails de guidage dont la longueur est déterminée en fonction des conditions de la carrière. Ce matériel permet le sciage sur les faces d'un bloc, ce qui le rend commercialisable, c'est-à-dire l'obtention des blocs des dimensions voulues.

Les principaux facteurs qui déterminent le régime de travail de la haveuse sont [17] :

- Vitesse de la chaîne.
- Vitesse de rotation de la chaîne sur guidage.
- Nombre et disposition des plaquettes diamantées synthétiques sur la chaîne.
- Distance entre la machine et la masse.

2.3.3 Cas sans Havage (par la machine au fil diamanté) :

L'Exploitation se fait sous forme d'un échiquier dépendant d'un front de pénétration qui est créé sous forme d'un couloir avec une base triangulaire qui permet la coupe au minimum de 2 masses d'une épaisseur de 1,6 m chacune par le biais du sciage au fil diamanté. [16]



Figure 2.3 : Machine de découpe au fil diamanté (Modèle Gamma 875) en position sur le site d'exploitation – Unité de Filfila (Cliché personnel, février 2026).

2.3.4 Dimension des Masses

Dans les deux (02) cas d'exploitation, les masses abattues devront avoir les dimensions minimales suivantes :

- Longueur : plus de 10 m
- Hauteur : plus de 5 m
- Largeur : de 1,2 à 1,8 m
- Volume optimal brut : 80 m³

➤ Les masses abattues seront débitées en blocs dont les dimensions seront de :

- Longueur : 1,5 à 2,80 m
- Largeur : 1,5 à 1,80 m
- Hauteur : 1,2 à 1,60 m

➤ Les volumes des blocs devront être de 1,5 m³ au minimum et de 7 m³ au maximum.

➤ Sens d'Exploitation

Le sens d'exploitation devra être déterminé suite à une observation méticuleuse des fronts et des plates-formes d'exploitation qui permettra de définir les différentes directions de fissuration.

➤ Abattage des masses

Après écartage de la masse à l'aide d'un Hydrobag ou Aérobag celle-ci abattue à l'aide d'un vérin. Les masses devront être abattues au-dessus d'un matelas de terrains stériles de façon à bien amortir la chute de ces dernières. La présence de blocs et petits blocs au sein de ce matelas est à proscrire.

➤ Nettoyage des fronts

Le nettoyage des fronts est une opération très importante dans l'exploitation des carrières à blocs. Les blocs marchands, les moellons, déblais et autres stériles devront être immédiatement évacués du front en cours d'exploitation après la fin du débitage de façon à préparer le front en question à un nouveau cycle d'exploitation. Les déblais devront être régulièrement évacués vers une zone de stockage spécialement aménagé en dehors des zones exploitables. [16]

2.3.5 Définition des Objectifs de Production

Les objectifs de production sont définis au niveau du plan d'exploitation de la Carrière qui est établi annuellement durant le 4ème trimestre de l'année en cours. Les objectifs de production annuels sont établis en tenant compte des facteurs suivants :

- Volume de réserves préparées existantes,
- Nombre de fronts existants,
- Taux de récupération au niveau des différents secteurs,
- Demande du marché pour les différentes variétés de marbre,
- Moyens matériels existants et éventuelle injection de moyens supplémentaires.

La répartition mensuelle des objectifs de production devra être établie en fonction des conditions climatiques (répartition minimale durant la période hivernale).

2.3.6 Organisation de l'Exploitation

En fonction de son importance, la Carrière peut être subdivisée en un ou plusieurs quartiers. La Carrière est dirigée par un chef d'exploitation qui est secondé par un ou plusieurs chefs de quartier. La Carrière peut être organisée en 1 ou 2 postes de 8 heures de travail. Des équipes spéciales peuvent être déployées durant les jours de fin de semaines (week end)en cas de nécessité. Chaque quartier devra avoir ses propres objectifs physiques et ses propres moyens matériels et humains. [16]

2.4 Programme de la Production Mensuelle

Le premier de chaque mois, un programme de production est établi par le service programmation sous la responsabilité du chef d'exploitation. Ce programme est établi selon les lignes directrices arrêtées dans le plan d'exploitation annuel approuvé au préalable par la Direction Générale. Dans ce programme seront prévus les fronts retenus pour l'exploitation ainsi que le nombre de masses à extraire de chaque front et les taux de récupération correspondants. Les moyens matériels prévus pour l'exploitation seront planifiés en prenant en ligne de compte les normes de sciage et de foration.

Normes Moyennes :

- Machine Diamanté : 4 m²/h
- Haveuse - Perforatrice : 2 cm/mn 6 ml/h

Chaque équipement de sciage et de foration comportera un numéro. Le nettoyage des fronts devra être également planifié pour éviter l'immobilisation des équipements de production de fronts. La planification des moyens matériels sera réalisée par l'agencement de plusieurs cycles d'exploitation ou cyclo gramme.

- Le cycle d'exploitation comprendra les opérations Suivantes :
 - Nettoyage des fronts,
 - Havage et foration,
 - Sciage au fil diamanté,
 - Abattage des masses,
 - Débardage et débitage des masses en blocs,
 - Évacuation des blocs.

- Le cycle d'exploitation pour une carrière fonctionnant en 2 postes de 8 heures ne devra excéder 10 jours. Plusieurs cycles d'exploitation sur différents fronts pourront être réalisés par les équipements suivants :
 - 01 Haveuse,
 - 01 Perforatrice,
 - 03 machines diamantées,
 - 01 Compresseur,
 - 01 Chargeur de capacité 4 à 5 m³.
- Un cycle d'exploitation permet d'extraire 200 m³ bruts par front. [17]

2.4.1 Qualité de la Production

2.4.2 Caractérisation et Classification de la Qualité de la Production

Au sein de l'unité de Filfila (ENAMARBRE), la valorisation de la production repose sur une classification rigoureuse des blocs extraits, basée sur des critères géométriques (dimensions, volumes) et qualitatifs (fissuration, homogénéité chromatique). Le suivi et la validation de cette production sont assurés par une commission technique interne. Cette dernière consigne mensuellement la répartition des volumes dans un registre officiel et via des procès-verbaux (PV), distinguant le Premier choix, le Deuxième choix et les blocains.

D'une manière générale, la plage de volumes requis pour les blocs marchands standards oscille entre 2 m³ et 7m³. Les spécifications techniques de chaque catégorie sont détaillées ci-après.

A. Blocs de Premier Choix

Les blocs classés en "Premier Choix" représentent la production à plus haute valeur ajoutée. Ils doivent impérativement répondre aux exigences géométriques et pétrographiques suivantes :

- **Intégrité structurale** : Absence totale de fissuration ou de micro-fracturation apparente.

- **Homogénéité esthétique :** Uniformité stricte de la tonalité et de la matrice du marbre (blanc ou gris), sans variations chromatiques brusques.
- **Qualité de la matrice :** Porosité macroscopique quasi nulle et absence de défauts de texture.
- **Qualité du façonnage :** Les six faces du bloc monolithique doivent être parfaitement équarries et rectilignes, une géométrie plane qui n'est obtenue que grâce à la précision du sciage au fil diamanté.

B. Blocs de Deuxième Choix et Catégories Assimilées

Les blocs de "Deuxième Choix" ou assimilés présentent des tolérances plus souples par rapport aux impératifs du premier choix :

- **Intégrité structurale :** Présence d'une fissuration modérée qui ne compromet pas la manipulation ou le débitage ultérieur du bloc en plaques.
- **Homogénéité esthétique :** Les variations de teintes sont tolérées, à condition qu'elles ne créent pas un contraste visuel trop prononcé ou préjudiciable à l'aspect ornemental.
- **Qualité du façonnage :** L'équarrissage au fil diamanté est exigé sur au moins quatre (04) des six faces du bloc.
- **Cas particuliers :** Tout bloc dont le volume est compris entre 1 m³ et 2 m³ est automatiquement assimilé et déclassé dans cette catégorie, indépendamment de sa qualité intrinsèque. [17]

2.4.3 Comparaison entre le fil diamanté et la haveuse à chaîne

Le choix de l'équipement de découpe est crucial pour la rentabilité de la carrière. Le tableau suivant compare la technologie du fil diamanté à celle de la haveuse à chaîne (Havage):

Tableau 2.2 : Comparaison technique entre le sciage au fil diamanté et la haveuse à chaîne[18]

Critères de comparaison	Sciage au fil diamanté	Haveuse à chaîne (Havage)
Profondeur de coupe	Très grande (virtuellement illimitée, peut dépasser 20 m)	Limitée (déterminée par la longueur du bras, généralement 2 à 4 m)
Flexibilité et configuration	Très élevée (permet des coupes dans tous les angles, horizontales, verticales ou inclinées)	Modérée à limitée (contrainte par la position du châssis et l'accessibilité de la voie)
Vitesse de coupe	Élevée (particulièrement performante sur les roches dures à moyennes comme le marbre/granit)	Moyenne (fortement dépendante de la dureté et de l'abrasivité de la roche)
Investissement initial	Modéré (coût d'acquisition de la machine relativement accessible)	Très élevé (équipement lourd et complexe)
Coût des consommables	Élevé (usure et remplacement régulier du fil diamanté)	Modéré (remplacement des pics/outils de coupe de la chaîne)
Consommation d'eau	Indispensable et élevée (nécessaire pour le refroidissement du fil et l'évacuation des boues)	Faible à modérée (selon les modèles, possibilité de travailler à sec ou avec une brumisation limitée)
Sécurité opératoire	Requiert une zone de sécurité stricte (risque de projection en cas de rupture du fil)	Risque de projection plus localisé, mais vigilance requise autour du bras en mouvement

2.5 Généralités sur le sciage au fil diamanté

Le sciage au fil diamanté est une technique de découpe mécanique par abrasion. Elle est devenue indispensable dans les carrières de marbre grâce à sa performance et sa capacité à extraire de grands volumes avec précision. [19] :

2.5.1 Composition de la machine au fil diamanté :

Le fil diamanté n'est pas un simple câble 'c'est un outil complexe composé de quatre éléments essentiels [19] :

2.5.2 Constitution technique et composants du fil diamanté

Le fil diamanté ne se résume pas à un simple câble de traction ; il s'agit d'un outil de coupe complexe de conception composite. Sa structure est optimisée pour transformer l'énergie mécanique cinématique en une action de sciage abrasive hautement précise. Selon le modèle de référence établi par Lanzetta et al. (2003), l'ensemble du système de découpe s'articule autour de composants interdépendants, décrits macroscopiquement et microscopiquement dans la **Figure suivante** [19] :

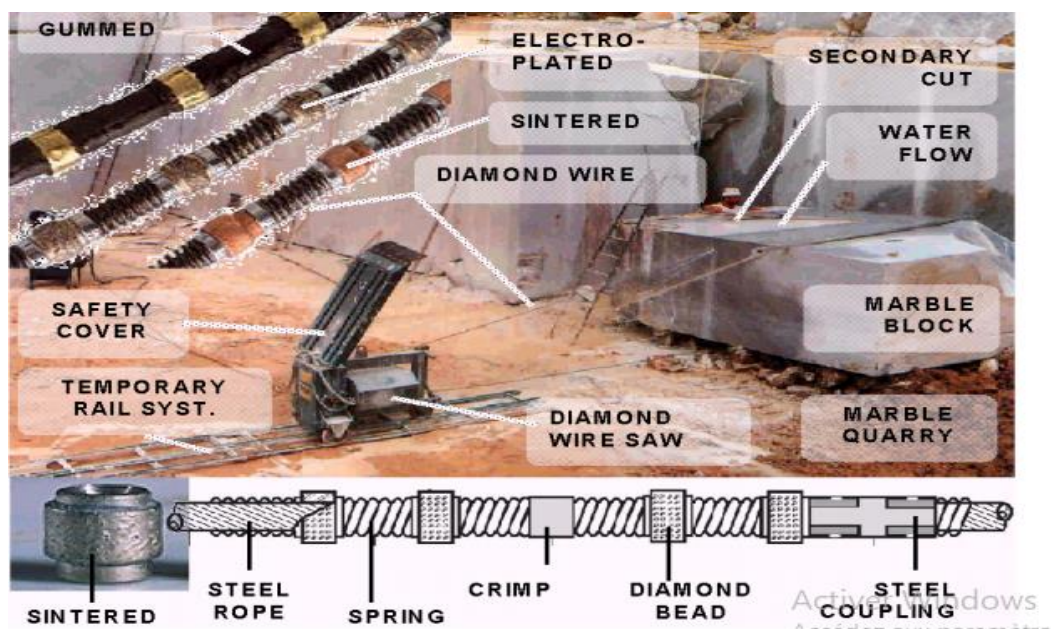


Figure 2.4 : Schéma descriptif de l'installation de sciage en carrière et constitution technique détaillée du fil diamanté (Adapté d'après Lanzetta et al., 2003). [19]

Terminologie et description fonctionnelle du système

L'analyse de la configuration d'exploitation présentée dans la **Figure 2.3** permet d'identifier deux sous-ensembles essentiels : le dispositif cinématique de surface et l'outil de coupe proprement dit.

1. **La machine au fil diamanté (Diamond Wire Saw) :** Il s'agit de l'unité motrice principale (à l'instar du modèle Gamma 875 utilisé sur notre site). Elle génère le couple nécessaire à la rotation du fil et applique la force de traction arrière indispensable pour maintenir le fil sous tension pendant la pénétration du massif.
2. **Le système de rails de guidage (Temporary Rail System) :** Ces voies de roulement rigides garantissent la trajectoire rectiligne de la machine lors de son recul progressif, stabilisant ainsi le plan de coupe.
3. **Le bloc de marbre (Marble Block) :** Le matériau cible subissant l'action géotechnique de découpe.
4. **Le flux d'eau de refroidissement (Water Flow) :** Un paramètre environnemental critique. L'injection continue d'eau au niveau de la saignée remplit un triple rôle : dissiper la chaleur intense issue du frottement, lubrifier l'interface diamant-roche et évacuer en continu les débris de broyage (le *slurry* ou boue de marbre) pour éviter l'encrassement des perles.

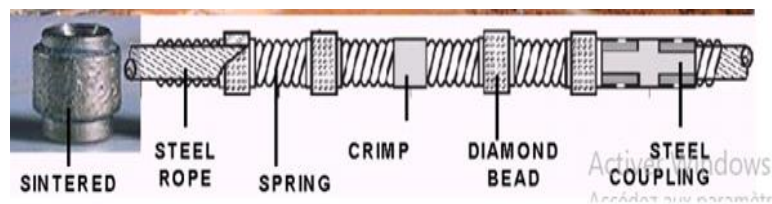


Figure 2.5 : Structure mécanique et composants principaux d'un fil diamanté. [19]

La vue en détail de la **Figure précédente** met en évidence l'agencement interne du fil, conçu pour allier flexibilité mécanique et résistance à l'abrasion :

- **Le câble d'âme en acier (Steel Rope) :** Constitué de torons d'acier à haute résistance, il supporte l'intégralité des contraintes de traction et de torsion induites par le moteur.

- **Les perles diamantées (*Diamond Beads*)** : Éléments actifs de l'outil, elles consistent en un anneau de liant métallique (fritté ou électrolytique) au sein duquel sont incrustés les grains de diamant industriel. Ce sont ces perles qui assurent l'abrasion de la calcite.
- **Les ressorts d'espacement (*Springs*)** : Enfilés entre les perles, ils maintiennent un espacement régulier tout en conférant au fil l'élasticité nécessaire pour absorber les chocs et les vibrations lors du passage d'une hétérogénéité structurelle dans le marbre.
- **Le système de sertissage (*Steel Coupling*)** : Assure la liaison mécanique et la fermeture de la boucle du fil.

Intérêt pour la démarche d'optimisation

Cette description anatomique montre que le comportement du fil diamanté dépend d'un équilibre fragile. Si la tension mécanique (T) exercée par la machine est excessive, le câble en acier subit un phénomène de fatigue menant à la rupture. Inversement, si le flux d'eau est insuffisant, l'élévation thermique dégrade la matrice métallique des perles, provoquant l'arrachement prématuré des diamants.

L'optimisation mathématique que nous développons dans la suite de ce travail prendra rigoureusement en compte ces contraintes physiques afin de maximiser la durée de vie des perles (*Diamond Beads*) tout en maintenant un rendement de coupe élevé. [19]

2.5.3 Cinématique et Principe de Fonctionnement du Procédé

Le mécanisme de découpe par fil diamanté repose sur la synchronisation rigoureuse de paramètres cinématiques et physiques. L'interaction entre l'outil composite et le massif rocheux est régie par la combinaison de deux mouvements principaux contrôlés par l'unité motrice (Gamma 875), complétée par une action tribologique de coupe et un contrôle thermique environnemental.

Le fonctionnement de la machine repose sur la combinaison de deux mouvements principaux essentiels pour assurer une coupe efficace et continue :

- **Le mouvement de rotation (Vitesse linéaire)** : Le moteur principal de la machine entraîne la poulie motrice, ce qui communique au fil diamanté une vitesse linéaire (généralement entre 20 et 40 m/s selon la dureté de la roche).

- **Le mouvement de traction (Recul de la machine) :** Pendant que le fil tourne, la machine se déplace lentement vers l'arrière sur ses **rails de guidage** (Temporary Rail Syst) pour maintenir une tension constante sur le fil contre la roche.
- **L'action abrasive :** Les **perles diamantées** (Diamond Beads) entrent en contact avec le marbre et agissent par abrasion, créant ainsi un trait de scie qui s'approfondit progressivement.
- **Le refroidissement :** Un flux d'eau constant (**Water Flow**) est dirigé vers le trait de scie pour refroidir les perles et évacuer les débris de coupe (la boue de marbre). [19]

2.5.4 Description de l'équipement expérimental (Cas de la Benetti Gamma 875)

La conduite de la phase expérimentale et le recueil des données opérationnelles sur le site de Filfila ont été réalisés en exploitant les infrastructures existantes de la carrière. L'équipement de découpe principal supervisé lors de nos essais est une scieuse à fil diamanté stationnaire de modèle **Gamma 875**, conçue par le constructeur italien *Benetti Macchine* (Année de fabrication : 2013).

Sur le plan structurel, cette unité motrice de forte puissance s'articule autour d'un bloc moteur asynchrone triphasé couplé à un système d'asservissement cinématique. La machine est positionnée sur un réseau de rails de guidage en acier solidement ancrés au sol de la plateforme de travail. Ce système de translation est critique : il gère le recul micrométrique et autonome du châssis au fur et à mesure de l'avancement de la saignée, garantissant le maintien d'une précontrainte (tension) nominale sur le fil diamanté. Le pilotage des paramètres cinématiques (vitesse périphérique, régulation de la tension, gestion des alarmes de rupture) est centralisé au niveau d'un pupitre de commande déporté, permettant à l'opérateur de conduire le process à distance de sécurité du front de taille (voir Figure 2.6). [20]



Figure 2.6 : Implantation de l'unité de sciage au fil diamanté Benetti Gamma 875 sur le site de Filfila, mettant en évidence le pupitre de commande et les rails de translation (Cliché personnel, 10 février 2026).

Les spécifications électromécaniques et constructives de cet équipement, extraites du manuel technique du fabricant et indispensables pour formuler nos équations de rendement énergétique, sont synthétisées dans le **Tableau suivant**

Tableau 2.3 : Fiche technique et caractéristiques opérationnelles de la scieuse de fil

Paramètre électromécanique	Spécification technique et caractéristique
Équipement	Scieuse cinématique à fil diamanté
Modèle	Gamma 875
Constructeur / Origine	Benetti Macchine / Italie
Année de mise en service	2013
Motorisation principale	Moteur électrique synchrone/asynchrone
Puissance nominale	55 kW
Système de régulation de tension	Recul motorisé autonome asservi électroniquement
Interface utilisateur	Pupitre de contrôle analogique et numérique déporté
Dispositif de guidage au sol	Châssis mobile sur rails en acier rigides

Contribution à la démarche d'optimisation

La puissance nominale de 55 kW de la machine Gamma 875 représente la limite supérieure de l'énergie disponible pour vaincre la résistance à la compression et à l'abrasion du marbre de Filfila. Lors de l'élaboration de notre modèle d'optimisation, cette puissance sera introduite comme une **contrainte**.

Une vitesse d'avance excessive imposerait un couple résistant supérieur à la capacité du moteur, provoquant des chutes de tension, un glissement du fil sur le volant moteur, ou la mise en sécurité thermique de l'installation. L'optimisation cherchera donc à maximiser le rendement de coupe (en m²/h) tout en maintenant la puissance appelée dans la plage de rendement optimal du moteur.

2.5.5 Caractérisation de l'outil de coupe : Le fil diamanté (Type Osadi)

Pour la réalisation des essais de découpe, l'outil de coupe mis en œuvre est un fil diamanté de type à ressorts, fourni par l'exploitant du site (Gamme haute performance de type Osadi). Cet outil composite est spécialement dimensionné pour résister aux sollicitations de traction axiale et de fatigue mécanique induites par le sciage des roches carbonatées massives.

Loin d'être un simple câble métallique monolithique, ce dispositif est constitué d'une âme en acier tressé de haute résistance sur laquelle sont enfilées des perles diamantées actives interspacées par des composants élastiques. Les ressorts insérés entre chaque perle jouent un rôle dynamique double :

- **Amortissement structural** : Ils absorbent les chocs micro-structuraux et les vibrations transitoires lorsque les perles rencontrent des hétérogénéités, des veines de quartz ou des plans de fracture au sein du massif de marbre.

- **Maintien du pas cinématique** : Ils garantissent un espacement inter-perles rigoureusement constant, assurant une répartition homogène des efforts de coupe sur chaque diamant et évitant le chevauchement des composants sous l'effet de la force de traînée.



Figure 2.7 : Mesure métrologique du diamètre initial ($d=10,53$ mm) d'une perle diamantée neuve à l'aide d'un pied à coulisse numérique de précision (Cliché personnel, février 2026).

Importance métrologique pour le modèle d'optimisation

La mesure initiale illustrée dans la **Figure 2.6** constitue le point zéro ($t = 0$) de notre suivi expérimental. Le diamètre mesuré de **10,53 mm** représente la dimension nominale de la perle avant toute sollicitation tribologique.

Le suivi de l'évolution de ce diamètre au fur et à mesure des surfaces coupées (exprimées en m^2) est le paramètre fondamental qui nous permettra de calculer analytiquement :

1. **L'usure spécifique du fil (Delta d/A)** : Exprimée en millimètres d'usure par mètre carré de marbre sevré (mm/m^2).
2. **La durée de vie résiduelle de l'outil** : Sachant que le fil est considéré comme usé à 100 % (en fin de vie) lorsque le diamètre de la perle atteint le diamètre du câble d'acier support (4,5 à 5 mm).

Cette caractérisation métrologique précise est indispensable pour alimenter la fonction objective de notre algorithme d'optimisation économique, visant à minimiser le coût d'outil par mètre carré extrait.

2.5.6 Classification et Caractérisation des Paramètres de Sciage

Pour formuler un modèle d'optimisation mathématique robuste, il est fondamental de classer les variables qui influencent directement le rendement de coupe (m^2/h) et le taux d'usure des perles (Δd). En ingénierie des mines, ces facteurs se divisent en deux grandes catégories :

1. **Les paramètres incontrôlables (Inhérents ou Fixes) :** Ce sont les propriétés intrinsèques du massif rocheux et les caractéristiques structurelles de l'outil fourni. L'ingénieur ne peut pas les modifier en cours d'opération, mais il doit obligatoirement s'y adapter.
2. **Les paramètres contrôlables (Opératoires ou Ajustables) :** Ce sont les variables cinématiques et environnementales que l'opérateur (ou l'automate de la machine Gamma 875) peut réguler en temps réel sur le front de taille pour maximiser l'efficacité de la découpe.

Le **Tableau 2.3** synthétise l'ensemble de ces paramètres relevés lors de notre campagne d'essais sur le site de Filfila. [21]

Tableau 2.4 : Classification et plages des paramètres de découpe recensés sur le site de Filfila. [21]

Catégorie de paramètre	Nature de la variable	Valeurs de référence / Plages de fonctionnement
Les paramètres incontrôlables <i>(Propriétés de la roche et spécifications de l'outil)</i>	Type de marbre prédominant	Marbre Blanc de Filfila (Faciès saccharoïde)
	Résistance à l'usure du marbre (Abrasivité)	6,4 g/cm ²
	Vitesse linéaire nominale du fil	40 m/s (Fixée par la motorisation)
	Type de fil diamanté	Câble à ressorts mécaniques (Type Osadi)

	Diamètre initial de la perle	11 mm, (Densité : 30 à 32 perles/m)
Les paramètres contrôlables <i>(Variables opératoires ajustables)</i>	Débit d'eau de refroidissement Q	0 à 0,5 L/s (<i>Régulation manuelle/vannes</i>)
	Vitesse d'avance du châssis (Va)	0 à 50 m/h (<i>Asservissement de recul</i>)
	Hauteur du front de taille (H)	1 à 6 m
	Surface totale de la section coupée	2 à 20 m ²

2.6 Diagnostic des Contraintes Opératoires et Problèmes Actuels sur le Site de Filfila

L'analyse technique des cycles d'abattage primaire menée lors de notre stage au sein de l'unité d'ENAMARBRE a mis en évidence plusieurs anomalies opérationnelles. Celles-ci impactent directement la productivité de la carrière et la durée de vie des consommables diamantés.

2.6.1 Approche expérimentale et limites de la conduite de coupe existante sur site

L'évaluation technique menée sur le front de taille de l'unité de Filfila révèle que les ajustements des paramètres opérationnels de la scieuse (modèle Benetti Gamma 875) s'effectuent en l'absence de protocoles standardisés ou d'asservissements préprogrammés. En pratique, la régulation du couple cinématique caractérisé par la vitesse linéaire du fil) et la vitesse d'avance du châssis (Va) est confiée à l'appréciation des opérateurs. Ces derniers modifient les commandes de manière itérative en se basant sur des indicateurs visuels indirects, tels que le degré de flèche (courbure concave) ou le comportement vibratoire du fil Osadi en cours de saignée



Figure 2.8 : Observation directe et supervision visuelle du processus de sciage par les opérateurs pour un réglage manuel basé sur l'expérience de terrain (Cliché personnel, 15 février 2026).

Bien que ce savoir-faire de terrain permette de maintenir la production, cette approche purement intuitive montre rapidement ses limites lors de l'analyse des performances de la carrière :

- **Sous-optimisation du rendement de coupe (m^2/h) :** Par mesure de sécurité et pour éviter la rupture du câble, les opérateurs adoptent souvent des vitesses d'avance très conservatrices, ce qui maintient la productivité de l'unité ENAMARBRE en deçà de sa capacité nominale.
- **Réponses inappropriées aux variations géotechniques :** Le massif de marbre de Filfila, bien qu'homogène, présente localement des variations de dureté ou des micro-discontinuités. Une correction manuelle tardive ou disproportionnée du recul de la machine induit des pics de tension transitoires qui fatiguent prématurément l'âme en acier du fil.

2.6.2 Carence de régulation du fluide de refroidissement et saturation par les boues de sciage

Un second dysfonctionnement critique identifié lors de notre diagnostic concerne la gestion du système d'arrosage. Aucune quantification rigoureuse ou estimation précise de débit (Q en L/s) n'est réalisée pour adapter le volume d'eau injecté aux dimensions réelles de la section de coupe.

Cette absence de contrôle du flux hydraulique se traduit directement sur le terrain par une accumulation massive de sédiments carbonatés (*slurry* ou boues de friction) qui sature entièrement la surface de la plate-forme de travail.



Figure 2.9: Accumulation importante de boue blanche sur la plate-forme de travail, démontrant un débit d'eau empirique et non contrôlé (Cliché personnel, 25 février 2026).

Sur le plan tribologique, cette accumulation de boue altère gravement l'environnement de coupe. Lorsque le débit d'eau est mal régulé, la pâte carbonatée stagne au sein de la saignée, agissant comme un milieu abrasif tiers non contrôlé qui frotte contre l'âme en acier du fil, provoquant sa rupture prématurée. De plus, la texture visqueuse de la boue freine la dissipation thermique, ce qui accélère la dégradation du liant métallique des perles Osadi.

2.6.3 Influence des réglages manuels et de la vétusté sur la stabilité de la machine

Les mesures de terrain indiquent que l'installation est soumise à des vibrations mécaniques excessives. Celles-ci sont principalement induites par les réglages cinématiques approximatifs mentionnés ci-dessus, mais sont également amplifiées par l'état d'usure de l'équipement et les conditions de sol défavorables (glissements sur les rails causés par la présence continue de boues d'exploitation). Cette instabilité dynamique engendre une sollicitation mécanique sévère des composants électromécaniques, ce qui accélère la détérioration des roulements, de la poulie motrice et du moteur de 55 kW.

Malgré les capacités nominales élevées de la machine Benetti Gamma 875, le problème majeur réside dans le fait qu'il n'existe actuellement aucune loi de comportement formalisée établissant une corrélation précise entre la vitesse d'avance de la machine et la hauteur géométrique du panneau de marbre à scier (H). Cette absence de règles directrices claires se traduit techniquement par une instabilité du courant électrique appelé (pics d'intensité) et par une usure prématurée de l'outil diamanté.

2.6.4 Conclusion du diagnostic : Vers une solution fondée sur une base scientifique

Ce diagnostic exhaustif met en exergue l'écart critique séparant la conduite métier traditionnelle et les impératifs de rentabilité d'une industrie minière moderne. Dès lors, notre étude se pose une question centrale : **Comment substituer à cette expérience manuelle et visuelle un protocole d'exploitation rigoureusement scientifique ?**

Pour répondre à cette problématique, notre objectif immédiat est de définir de manière déterministe les paramètres opératoires idéaux (couple vitesse-avance optimisé et débit d'eau rationnel). Il s'agit de formuler un modèle d'optimisation capable de maximiser le rendement horaire de l'unité de Filfila tout en garantissant l'intégrité structurelle de la scieuse et en prolongeant la durée de vie utile du fil diamanté. C'est cette démarche de modélisation mathématique quantitative qui constituera le cœur du chapitre suivant.

2.7 Protocole de Collecte des Données et Instrumentation Expérimentale

Afin de s'affranchir de la subjectivité des réglages traditionnels observés sur le front de taille et d'établir une solution fondée sur une base scientifique, un protocole expérimental rigoureux a été implémenté. La collecte systématique des données de terrain s'est articulée autour de cinq (05) phases opératoires distinctes.

2.7.1 Phase 1 : Caractérisation géométrique du panneau de roche

Avant l'initiation de chaque cycle de découpe, les dimensions nominales du panneau de marbre brut en cours d'extraction sont relevées (voir **Figure 2.10**). La mesure de la longueur (L) et de la hauteur (H) de la section permet de calculer par intégration géométrique la surface totale nette à scier (A, exprimée en m^2) :



Figure 2.10 : Morphologie d'un bloc de marbre sur le front de taille lors de la phase de relevé des dimensions macroscopiques (Cliché personnel, 03 février 2026).

($A = L \times H$) Cette grandeur constitue le dénominateur de référence pour l'évaluation des rendements horaires et des taux d'usure spécifiques de l'outil.

2.7.2 Phase 2 : Suivi métrologique de l'usure du fil diamanté

L'évaluation de la cinétique d'usure nécessite un suivi micrométrique du diamètre des perles actives avant et après chaque saignée. Afin de garantir la répétabilité des mesures et d'éliminer les biais statistiques dus à la ressemblance des perles, une méthodologie de suivi par « perle témoin » a été mise en place.

Une perle spécifique est isolée et identifiée de manière permanente à l'aide d'un repère en fil de cuivre de faible section enroulé sur le câble d'acier support (voir **Figure 2.11**). Ce repère mécanique s'est avéré particulièrement résistant aux conditions extrêmes du milieu (frictions, projections de *slurry*). Les relevés de diamètre (d exprimés en mm) sont effectués à l'aide d'un pied à coulisse numérique de précision.

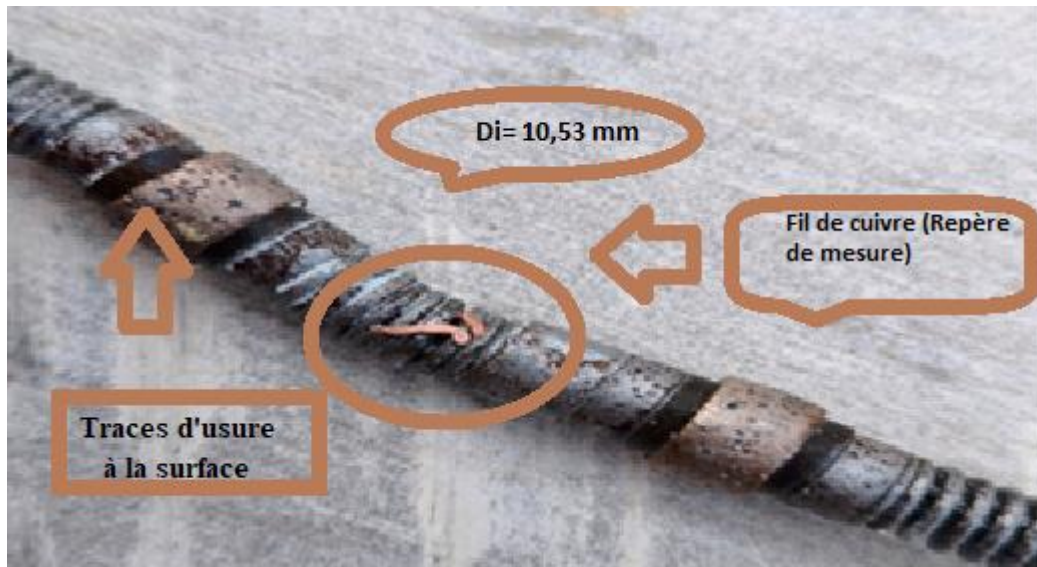


Figure 2.11 : Schéma descriptif de l'évolution morphologique de la perle témoin et positionnement du repère de mesure en cuivre (Adapté et dessiné d'après clichés personnels, 22 février 2026).

2.7.3 Phase 3 : Chronométrage des cycles et calcul du rendement

Le temps de sciage effectif (t , exprimé en heures) est mesuré à l'aide d'un chronomètre industriel, en excluant les phases d'arrêt technique ou de maintenance secondaire. Cette donnée temporelle permet de déterminer deux indicateurs de performance clés :

- **La vitesse d'avancement réelle (V):** exprimée m/h ou en cm/h.
- **Le rendement horaire de coupe (R_h) :** exprimé en m^2/h , défini par le rapport A/te .

2.7.4 Phase 4 : Monitoring de l'intensité électrique et de la résistance de coupe

Compte tenu de l'ancienneté opérationnelle de la scieuse Benetti Gamma 875 (mise en service en 2013), la surveillance des paramètres électriques au niveau du pupitre de commande (voir **Figure 2.12**) s'avère indispensable. Ce suivi remplit un double rôle:

- **Protection du système d'entraînement** : Le suivi visuel de l'ampèremètre analogique (voir **Figure 2.13**) permet de s'assurer que l'intensité appelée par le moteur principal de 55\ kW ne franchit jamais le seuil critique de sécurité, fixé empiriquement à **75 Ampères**. Tout dépassement de cette frontière de sécurité expose l'installation à des surchauffes ou à des ruptures de phase.
- **Analyse de la résistance à la découpe** : L'intensité du courant électrique (I) est directement proportionnelle au couple résistant s'exerçant à l'interface perle-marbre. Une élévation subite de l'ampérage traduit soit une vitesse d'avance excessive par rapport à la dureté locale de la roche, soit un bourrage de la saignée par accumulation de fines.



Figure 2.12 : Configuration générale du pupitre de commande déporté de la scieuse Gamma 875 (Cliché personnel, 12 février 2026).

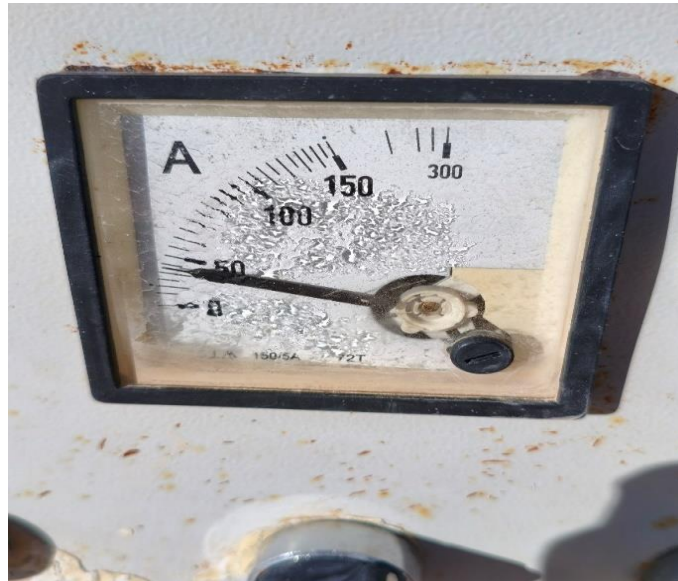


Figure 2.13 : Gros plan sur l'ampèremètre de contrôle de la charge du moteur principal
(Cliché personnel, 17 février 2026).

2.7.5 Phase 5 : Quantification expérimentale du flux de refroidissement

Afin de contrôler le paramètre hydraulique Q , une méthode de jaugeage volumétrique a été déployée sur le site. Elle consiste à mesurer le temps de remplissage (t , en secondes) d'un récipient étalonné d'une capacité nominale de 5 litres positionné à la sortie du circuit d'arrosage. Le débit réel est ainsi formalisé par la relation :

$$Q = \frac{V_{et}}{tr}$$

Q : Représente le débit réel de l'eau de refroidissement, exprimé en litres par seconde L/s .

V_{et} : Représente la capacité nominale (le volume) du récipient étalonné, fixé dans ce protocole à $5 L/s$.

tr : Représente le temps de remplissage du récipient, mesuré à l'aide du chronomètre et exprimé en secondes (s).

Ce protocole permet un étalonnage rigoureux du débit pour valider les seuils nécessaires à une bonne dissipation thermique et à une évacuation fluide des boues de marbre.

2.8 Stratégie Expérimentale : La Méthode OFAT (One-Factor-At-a-Time)

Pour isoler l'influence de chaque variable opératoire sur le comportement du fil diamanté, la campagne d'essais a été structurée selon la stratégie expérimentale **OFAT** (*One-Factor-At-a-Time* ou méthode à un facteur à la fois).

2.8.1 Principe de l'approche OFAT

Selon la formalisation théorique de Montgomery (2017), la méthode OFAT consiste à définir un point de fonctionnement de référence pour l'ensemble des variables étudiées. Par la suite, l'expérimentateur fait varier de manière séquentielle un unique facteur sur toute sa plage de fonctionnement admissible, tandis que tous les autres paramètres sont maintenus rigoureusement constants à leur niveau de référence initial.

Une fois les matrices d'essais complétées, des courbes de réponse univariées sont tracées pour caractériser l'effet propre de chaque facteur sur le système. Les critères d'évaluation de cette

Approche, appliqués au contexte industriel de l'unité de Filfila, sont synthétisés dans le **Tableau 2.4. [22]**:

Tableau 2.5 : Analyse critique, avantages et limites de la stratégie expérimentale OFAT (D'après Montgomery, 2017). [22]

Avantages Opérationnels	Limites et Contraintes Statistiques
* Interprétation directe : Permet une lecture simple et intuitive des résultats via des graphiques bidimensionnels clairs. * Isolement des variables : Facilite la compréhension de l'effet individuel de la vitesse d'avance V_a ou du débit d'eau (Q) sur le taux d'usure des perles.	* Incapacité à détecter les interactions : Ne permet pas de caractériser les effets de synergie ou d'antagonisme lorsque plusieurs facteurs varient simultanément (ex : effet combiné d'une hausse de V associée à une baisse de Q) * Efficacité statistique restreinte : Exige un nombre d'essais globaux plus important qu'un

* Pragmatisme industriel : Approche largement plébiscitée en carrière en raison de sa simplicité de mise en œuvre, ne nécessitant pas de modélisations statistiques multi-variables complexes lors de la phase initiale d'acquisition.	plan d'expériences factoriel pour un niveau de précision équivalent. * Risque d'optimal local : Peut conduire à des conclusions incomplètes si les variables de coupe sont fortement corrélées entre elles.
--	--

Conclusion

En somme, le passage de l'analyse théorique aux réalités opérationnelles du front de taille de Filfila a mis en évidence la complexité technique inhérente à l'abattage des roches ornementales. Entre les contraintes électromécaniques d'une unité de sciage mise en service en 2013 exigeant un suivi rigoureux de l'intensité pour ne pas franchir le seuil limite de 75 Ampères et les difficultés métrologiques d'isolement d'une perle témoin dans un milieu saturé de boues abrasives, un protocole expérimental robuste et reproductible a pu être validé.

Ces investigations de terrain ont permis, grâce à la méthodologie OFAT, d'isoler l'impact direct de chaque variable de réglage sur la cinématique de découpe et sur la cinétique d'usure du fil Osadi. Disposant désormais d'une base de données brute fiable et d'un diagnostic précis des réalités géotechniques du gisement, les fondements requis pour l'élaboration de notre modèle sont solidement posés.

Le chapitre suivant (Chapitre III) sera dès lors dédié au traitement analytique de ces résultats expérimentaux, afin de formaliser la transition définitive entre la conduite de coupe traditionnelle (conventionnelle) et une **solution fondée sur une base scientifique** dédiée à l'optimisation des performances de l'unité ENAMARBRE.

CHAPITRE 3

OPTIMISATION DU SCLAGE

AU FIL DIAMANTÉ DANS

LA CARRIÈRE À BLOCS

(FILFILA)

Introduction

Ce chapitre est dédié à l'**évaluation expérimentale** des performances de la machine Gamma 875 lors des opérations de sciage au fil diamanté au sein de la carrière de FILFILA. L'enjeu majeur de cette phase consiste à lever les contraintes opérationnelles préalablement identifiées. Plus précisément, il s'agit d'optimiser les paramètres de coupe afin de substituer aux **pratiques conventionnelles** actuelles une approche scientifique rigoureuse, visant à accroître la rentabilité globale du site.

Pour atteindre cet objectif, nous avons choisi une approche méthodologique fondée sur la méthode OFAT (One Factor At a Time). Cela nous permet d'isoler avec précision l'effet de chaque variable sur le processus de sciage et de comprendre son impact sur les performances de la machine Gamma 875.

La méthode **OFAT** (One Factor At a Time), également qualifiée d'**analyse univariée** ou **monothématique**, constitue un protocole expérimental consistant à évaluer l'influence des facteurs de manière isolée plutôt que simultanée. Cette approche s'avère particulièrement efficace pour le diagnostic technique, car elle permet de hiérarchiser les variables selon leur impact sur le résultat observé.

Le principe fondamental de cette méthode repose sur le postulat **caeteris paribus** (toutes choses égales par ailleurs) : un seul paramètre est modifié tandis que l'ensemble des autres variables est maintenu constant. Dans ce cadre, les **tests d'hypothèses** représentent les outils statistiques privilégiés pour valider la significativité des variations observées.

Bien que les analyses complexes (plans d'expériences factoriels) soient recommandées pour explorer les interactions entre plusieurs facteurs, l'approche OFAT demeure la solution de référence pour les praticiens lorsque les données sont abondantes et que l'objectif premier est une identification directe et rapide des leviers d'optimisation.

3.1. Analyse expérimentale

Conformément au protocole **OFAT**, les paramètres opératoires sont définis de telle sorte qu'une seule variable soit modifiée par itération. Cette méthodologie permet d'isoler l'influence intrinsèque de chaque facteur sur le processus de sciage.

3.1.1 Protocole d'optimisation des paramètres de coupe sur site :

Afin d'améliorer les performances de la machine **Gamma 875** et de lever les contraintes opérationnelles identifiées au chapitre précédent, une approche expérimentale structurée en quatre phases successives a été mise en œuvre sur le site de FILFILA :

Conformément au protocole **OFAT**, les paramètres opératoires sont définis de telle sorte qu'une seule variable soit modifiée par itération. Cette méthodologie permet d'isoler l'influence intrinsèque de chaque facteur sur le processus de sciage.

➤ Phase I : Optimisation de la vitesse d'avance V_a

Considérant que les réglages actuels reposent sur des **pratiques artisanales**, nous avons mené des essais systématiques en faisant varier la vitesse d'avance tout en maintenant les autres paramètres invariants. L'objectif était d'identifier la vitesse optimale permettant d'établir un compromis efficient entre la productivité (temps de cycle) et la longévité de l'outil (usure du fil).

Sur la base des résultats obtenus, on sélectionne la vitesse optimale nommée (V_{opt}), puis on passe à la phase II

➤ Phase II : (optimisation de la hauteur H)

En utilisant la valeur (V_{opt}) établie précédemment, nous avons procédé à l'ajustement de la hauteur de coupe (H). Les mesures in situ ont permis de déterminer la hauteur optimale (H_{opt}) la mieux adaptée à la configuration géologique et géométrique de la surface de coupe.

➤ Phase III : (Optimisation de la largeur L)

Une fois les valeurs (V_{opt}) et (H_{opt}) fixées, nous avons analysé l'influence de la largeur (L). Cette étape, réalisée sous supervision directe, a permis de stabiliser la cinématique de coupe et d'assurer la régularité du processus de production.

➤ Phase IV: (Optimisation du débit d'eau Q)

Après stabilisation des paramètres géométriques et cinématiques, cette ultime phase a été consacrée à l'ajustement du flux hydraulique (Q). L'enjeu était de définir le débit critique nécessaire pour garantir un refroidissement optimal des perles diamantées et assurer une évacuation efficace des boues de sciage (slurry), évitant ainsi tout encrassement abrasif. Ce débit optimal (Q_{opt}) vient compléter notre modèle global.

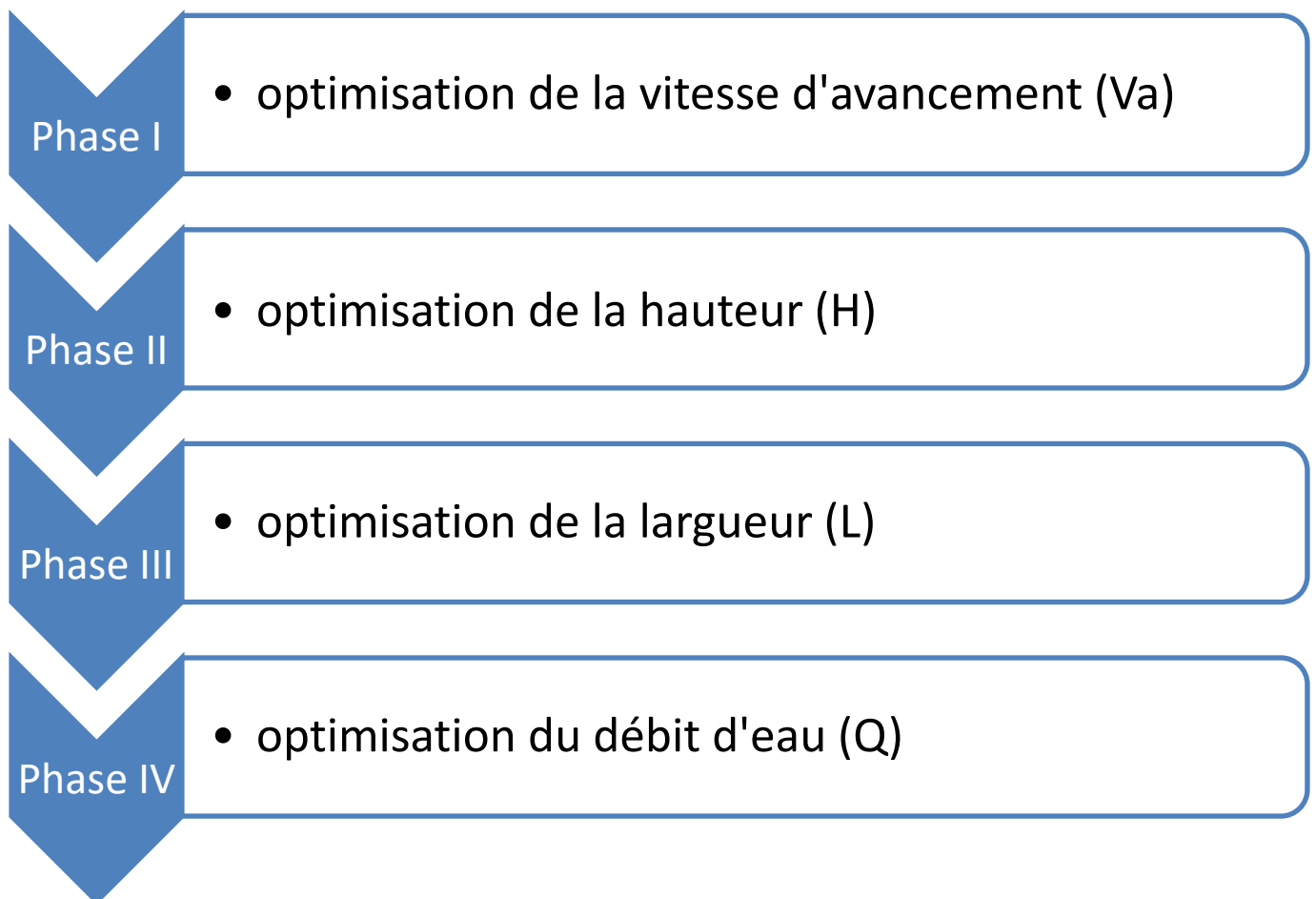


Figure 3.1 : Schéma illustrant les étapes de la méthode (OFAT)

3.1.2 Conditions initiales de l'expérimentation

Avant l'engagement des tests, les paramètres fixes de référence ont été établis comme suit :

- Débit d'eau (Q) = 0,5 L/s

- La surface(S) = 10 m²
- La hauteur de gradin (H) = 4 m

3.1.3 Phase I : Variation de la vitesse

L'expérimentation a consisté en un balayage de la vitesse d'avance sur une plage allant de 0,5 jusqu'à 3,5 m/h avec un pas de 0,5

Objectif : Monitorer le comportement cinématique de la machine et prévenir tout risque de surcharge thermique ou mécanique du moteur principal.

3.1.4 Protocole d'essais dans le terrain :

Nous avons modifié progressivement la vitesse d'avance V_a en partant de 0,5 m/h jusqu'à atteindre la vitesse maximale de 3,5 m/h. Cette plage nous permet d'observer le comportement du fil diamanté depuis la vitesse lente jusqu'à la vitesse critique, afin de déterminer la vitesse optimale (V_{opt}).

3.1.5 Protocole opératoire in situ :

L'ajustement progressif de la vitesse d'avance V_a a permis d'observer la réponse du fil diamanté sur un spectre large (de la vitesse de transition à la vitesse critique). Cette démarche vise à identifier la **vitesse optimale**, point d'équilibre entre productivité et intégrité du matériel.

3.1.6. Formalisme mathématique et outils de mesure :

Pour quantifier les performances, les relations suivantes ont été exploitées :

A. Paramètres géométriques et rendement

- ✓ **Surface sciée:** Déterminée par la relation classique de géométrie plane [23]

$$S = L * H$$

Où : S est la surface (m²), L : la longueur (m) et H la hauteur (m).

- ✓ **Rendement de coupe (R) :** Indicateur de productivité horaire [24]

$$R = S / T$$

Où : R est exprimé en m^2/min et T représente le temps effectif de sciage mesuré par **chronomètre professionnel exprimé en minutes**.

B. Usure du fil diamanté

L'usure diamétrale (Delta d) est calculée selon l'approche de Yilmaz Kaya (2018) [25]

$$\Delta d = d(\text{finale}) - d(\text{initial})$$

d : Diamètre ; en mm

Les mesures de diamètre (d) sont effectuées sur les perles à l'aide d'un **pied à coulisse numérique** de précision (voir Figure 3.2).



Figure 3.2 : Mesure du diamètre d'une perle (Cliché personnel, 25/02/2026).

C. Analyse énergétique

Énergie spécifique (Es) : Consommation énergétique par unité de surface [26]

$$E_s = (P \times T) / S$$

La puissance active (P) du moteur triphasé est définie par [27] :

$$P = \sqrt{3} * U * I * \cos \Phi$$

Avec :

U : Tension nominale = 380 V

I : Intensité mesurée via une **pince ampèremétrique** et confirmée par le cadran analogique (voir Figure 3.3).

Cos Φ : : Facteur de puissance, fixé à 0,8 (Donnée constructeur : *Pellegrini Meccanica*)

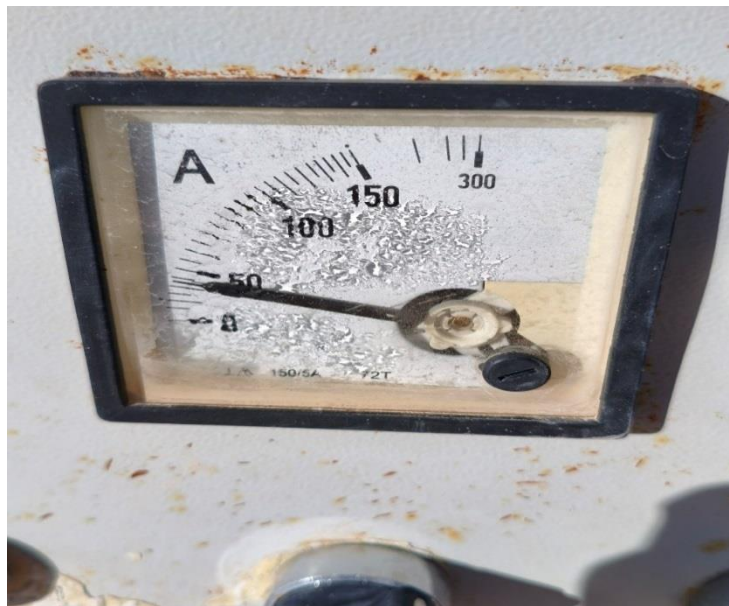


Figure 3.3 : Lecture de l'intensité sur l'ampèremètre analogique de la machine (Cliché personnel, 16/02/2026)

- **Intensité électrique (I) :**

La mesure de l'intensité consommée par le moteur principal a été effectuée à l'aide d'une **pince ampèremétrique** (mesure instantanée) et validée par la lecture directe sur le **cadran de**

l'**ampèremètre analogique** intégré au pupitre de commande de la machine Gamma 875 (voir **Figure 3.3**). Cette double vérification permet de s'assurer de la stabilité du courant durant les phases de pleine charge.

- **Temps de sciage (T) :**

Le temps effectif de découpe, hors phases de réglage et d'approche, a été chronométré avec précision. Cette donnée est fondamentale pour le calcul du rendement horaire et de la vitesse de coupe réelle.

3.2 Résultats et Interprétation

3.2.1. Synthèse des données expérimentales

Le tableau ci-dessous compile les relevés de terrain (paramètres cinématiques et électriques) ainsi que les indicateurs de performance calculés (énergie et rendement) pour les sept essais réalisés sur le marbre de Filfila.

Tableau 3.1 : Synthèse des indicateurs de performance du sciage (Gamma 875)

Essai	Q (L/s)	Va (m/h)	H (m)	S (m ²)	T (min)	I (A)	Δd (mm)	Es (kWh)	R (m ² /h)
1	0,5	0,5	4	10	313	40	0,03	10,98	1,91
2	0,5	1	4	10	162	55	0,05	7,82	3,7
3	0,5	1,5	4	10	112	62	0,06	6,09	5,35
4	0,5	2	4	10	79	68	0,09	5,31	7,59
5	0,5	2,5	4	10	68	74	0,13	5	8,82
6	0,5	3	4	10	56	85	0,18	4,68	10,71
7	0,5	3,5	4	10	44	98	0,24	4,52	13,63

3.2.2. Analyse de la réponse électrique du moteur

D'après les résultats du tableau on peut tracer la courbe suivante :

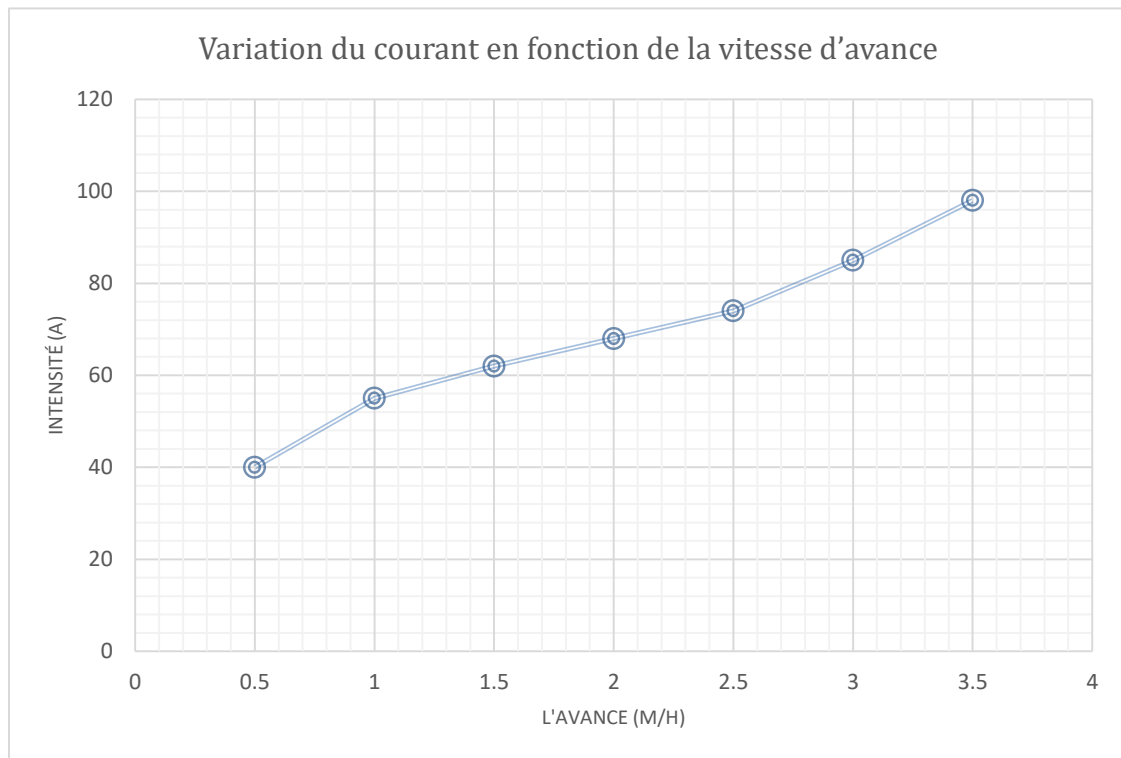


Figure 3.4 : Évolution de l'intensité de courant absorbé (I) en fonction de la vitesse d'avance (V_a).

L'analyse de cette courbe permet d'établir les conclusions techniques suivantes :

- **Corrélation directe** : On observe une croissance quasi linéaire de l'ampérage avec l'augmentation de la vitesse d'avance. Ce phénomène s'explique par l'accroissement de la résistance à la coupe et de la pression de contact du fil sur la roche.
- **Régime de fonctionnement nominal (0,5 - 1,5 m/h)** : Dans cette plage, le moteur opère sous une charge modérée (40 à 62 A), garantissant une stabilité thermique optimale.
- **Approche du seuil de vigilance** : À $V_a = 2,5$ m/h, l'intensité atteint 74 A. Cette valeur frôle le seuil de sécurité thermique du moteur, généralement fixé à 75 A pour ce type d'équipement.
- **Régime critique et surcharge** : Au-delà de 2,5 m/h, les valeurs enregistrées (85 à 98 A) traduisent une surcharge sévère. Ce régime entraîne un échauffement excessif des bobinages et réduit prématurément la durée de vie du moteur.

Préconisation technique : Afin de garantir la pérennité du groupe moteur et d'éviter les arrêts de production pour maintenance curative, il est impératif de limiter la vitesse d'avance à un **maximum de 2,0 m/h.**

3.2.3. Analyse de l'usure du fil diamanté en fonction de la vitesse d'avance

L'analyse des figures 3.5 et 3.6 met en évidence une corrélation directe entre la vitesse d'avance (V_a) et le taux d'usure du fil diamanté. Le comportement du système peut être segmenté en deux régimes distincts :

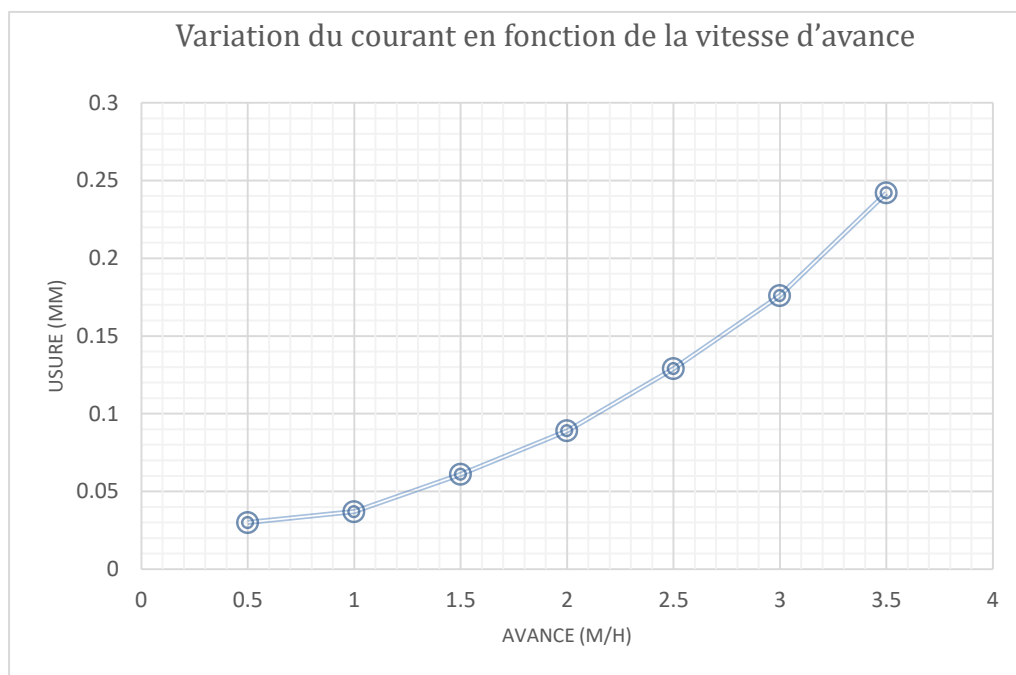


Figure 3.5 : Influence de la vitesse d'avance (V_a) sur l'usure du fil (mm).

- **Zone de stabilité :** $V_a \leq 1$ m/h: Entre 0,5 et 1,0 m/h, l'usure du fil reste minimale et stable, oscillant dans une plage étroite de 0,03 à 0,04 mm . Cette stabilité Taylorienne indique que le débit de refroidissement actuel (0,5 L/s) est pleinement efficace. Il assure une lubrification optimale et une évacuation continue des calories ainsi que des débris de coupe (slurry).

On note que stabilité Taylorienne désigne une phase de stabilité où l'usure augmente de manière très lente et linéaire en fonction du temps ou du volume de matériau coupé. C'est la zone de fonctionnement idéale.

- **Zone critique ($V_a > 1,0$ m/h) :** Dès que la vitesse d'avance franchit le seuil de 1,0 m/h, on observe une accélération exponentielle de l'usure. Celle-ci atteint 0,06 mm à 1,5 m/h pour culminer à 0,09 mm à 2,0 m/h, soit un triplement de l'usure par rapport au régime initial.

Interprétation mécanique et contrainte physique :

Cette dégradation prématurée s'explique par un phénomène de saturation cinétique au niveau du trait de scie. À des vitesses d'avance élevées, le volume de copeaux (boue abrasive) généré dépasse la capacité d'évacuation hydrodynamique du fluide de refroidissement. La boue stagne, agissant comme un tiers corps abrasif, ce qui provoque un échauffement excessif et une dégradation thermique de la matrice liante des perles diamantées (phénomène de déchaussement des diamants).

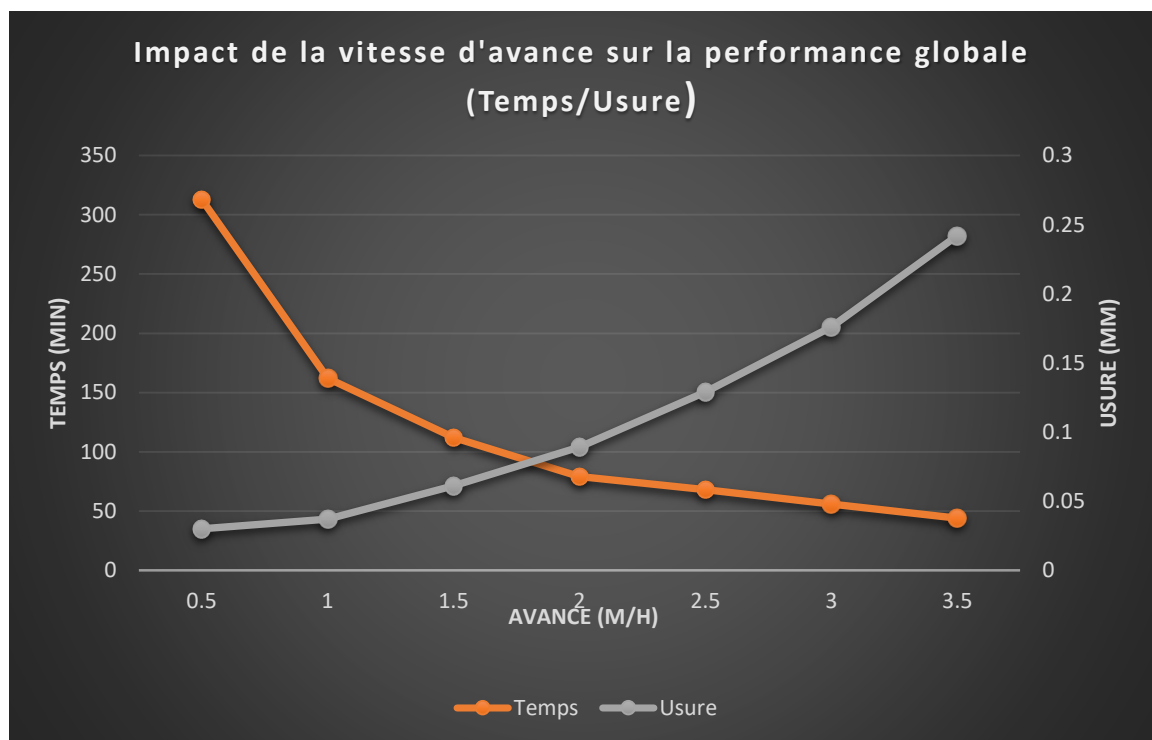


Figure 3.6 : Évolution conjointe du temps de sciage et de l'usure du fil en fonction de la vitesse d'avance.

Optimisation et validation du paramètre opératoire :

Bien que l'augmentation de la vitesse d'avance réduise le temps de sciage global (comme illustré sur la Figure 3.6), le coût induit par le remplacement prématuré du fil diamanté compromet la rentabilité économique de l'opération. Afin de concilier productivité et longévité de l'outil, les vitesses supérieures à 1,0 m/h doivent être exclues.

Par conséquent, la **vitesse optimale d'avance est fixée à $V_{opt} = 1,0$ m/h**, représentant le meilleur compromis techno-économique.

3.2.4. Réflexion sur le choix optimal : Entre calculs théoriques et réalité du terrain :

La détermination des paramètres de coupe ne peut se limiter à une simple lecture de courbes d'optimisation mathématique ; elle doit impérativement intégrer les contraintes dynamiques et opérationnelles du chantier.

- **Le compromis Temps-Usure (Productivité vs Dégradation) :** L'analyse croisée des variables temporelles et matérielles révèle un levier de productivité majeur. Le passage d'une vitesse d'avance de 0,5 m/h à 1,0 m/h permet de diviser le temps de cycle par deux, générant un gain net de 151 minutes. Si ce gain de productivité est indéniable sur le plan théorique, sa viabilité opérationnelle nécessite une validation rigoureuse des conditions de stabilité de la machine.
- **Le diagnostic technique et contraintes dynamiques :** En condition réelle de production, le comportement vibratoire de l'installation devient un facteur limitant. Dès que la vitesse d'avance atteint le seuil de 1,0 m/h, les discontinuités géométriques du fil (notamment au niveau des manchons de raccordement) induisent des efforts d'impact cycliques. Ces « à-coups », appliqués sur un câble déjà soumis à une forte tension de précharge, génèrent des vibrations harmoniques néfastes pour la stabilité transitoire de la structure et accélèrent la fatigue mécanique des composants.
- **Le compromis de sécurité :** Afin de ne pas compromettre l'intégrité structurelle de la machine au profit d'un gain de temps immédiat, la démarche de maintenance conditionnelle impose de définir une **plage de travail critique située entre 0,8 et 1,0 m/h**.

Stratégie de pilotage opérationnel :

- **À 0,8 m/h (Régime de croisière) :** Cette vitesse garantit un fonctionnement fluide et un régime stationnaire, minimisant les sollicitations dynamiques sur le fil. C'est le choix de la sécurité et de la maximisation de la durée de vie du matériel.
- **À 1,0 m/h (Régime de pointe) :** Cette valeur constitue la limite haute admissible (réserve de productivité). Elle est à utiliser de manière ponctuelle pour absorber les pics de production ou optimiser des cycles spécifiques, juste avant que le taux d'usure et le niveau vibratoire ne basculent dans une zone d'inefficacité économique.

3.3. Phase II : Sensibilité de la hauteur du gradin (H)

3.3.1. Paramètres et objectifs de l'essai

Cette seconde phase expérimentale vise à évaluer l'influence de la configuration géométrique du front de taille sur les performances de coupe du fil diamanté. Les conditions opératoires initiales ont été fixées sur la base des résultats de la Phase I :

- ✓ **Vitesse d'avance (V_a) :** Constante et fixée à 1,0 m/h valeur optimale validée précédemment.
- ✓ **Débit de fluide de refroidissement (Q) :** Constant à 0,5 L/s.
- ✓ **Variable d'étude :** Hauteur du gradin (H), variant de 2,0 m à 6,0 m.

- **Standardisation du paramètre cinématique :**

L'intégration de la vitesse optimale = 1,0 m/h comme constante opératoire permet d'isoler l'impact des facteurs géométriques du gisement. Ce choix méthodologique assure que les variations d'usure ou de comportement mécanique observées soient exclusivement imputables aux modifications de la hauteur du front.

- **Objectifs de l'étude de sensibilité :**

L'enjeu de cet essai est d'identifier les limites opérationnelles de l'installation face aux contraintes dimensionnelles de la carrière. En faisant varier la hauteur H de 2 à 6 mètres, l'objectif est de cartographier les régimes de transition critique où les sollicitations thermomécaniques (échauffement moteur, accélération de l'usure) menacent l'intégrité du système.

- **Le paradoxe de la surface de coupe constante :**

D'un point de vue macroscopique, bien que la surface totale de sciage soit maintenue constante (fixée à 10 m²), les conditions tribologiques aux interfaces de coupe évoluent considérablement. Une augmentation de la hauteur du gradin implique un allongement de l'arc de contact entre le fil et la roche.

Les conditions tribologiques résument scientifiquement l'interaction globale (Frottement + Usure + Lubrification + Température de définir une enveloppe de fonctionnement sécuritaire pour l'optimisation des schémas d'exploitation et du découpage des gradins au sein de la carrière de Filfila.

Les mesures cinématiques, thermiques et d'usure relevées lors de cette phase expérimentale sont synthétisées dans le Tableau 3.2 ci-dessous.

3.3.2. Tableau de synthèse des essais de la Phase II

Le Tableau 3.2 rassemble les paramètres cinématiques, électriques et tribologiques enregistrés lors du sciage du marbre de Filfila pour différentes configurations géométriques de gradin (la surface totale de coupe étant maintenue constante à $S = 10 \text{ m}^2$).

Tableau 3.2 : Données expérimentales du sciage en fonction de la hauteur du gradin (H)

Hauteur H(m)	Longueur L(m)	Temps T(min)	Intensité I (A)	Usure du fil(mm)	Rendement R(m ² /h)
2,0	5,0	317	38,4	0,04	1,89
3,0	3,3	214	48,1	0,04	2,80
4,0	2,5	168	59,0	0,05	3,57
5,0	2,0	143	72,0	0,06	4,22
6,0	1,6	129	88,0	0,09	4,65

- À partir de ce tableau on peut faire les courbes suivantes :

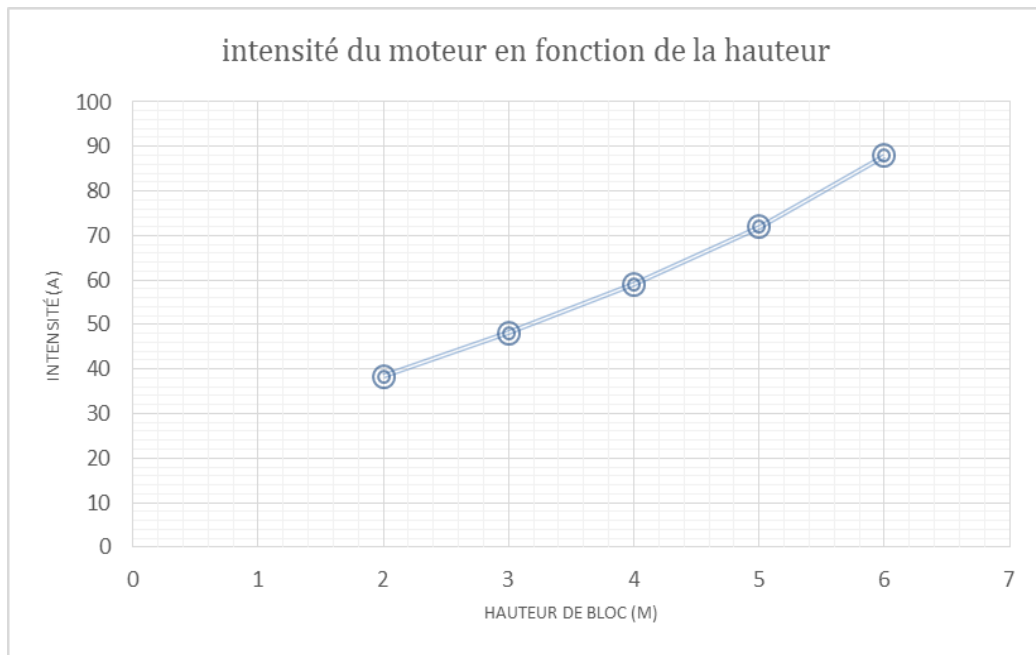


Figure 3.7 : Influence de la hauteur du gradin (H) sur l'intensité du moteur principal (I)

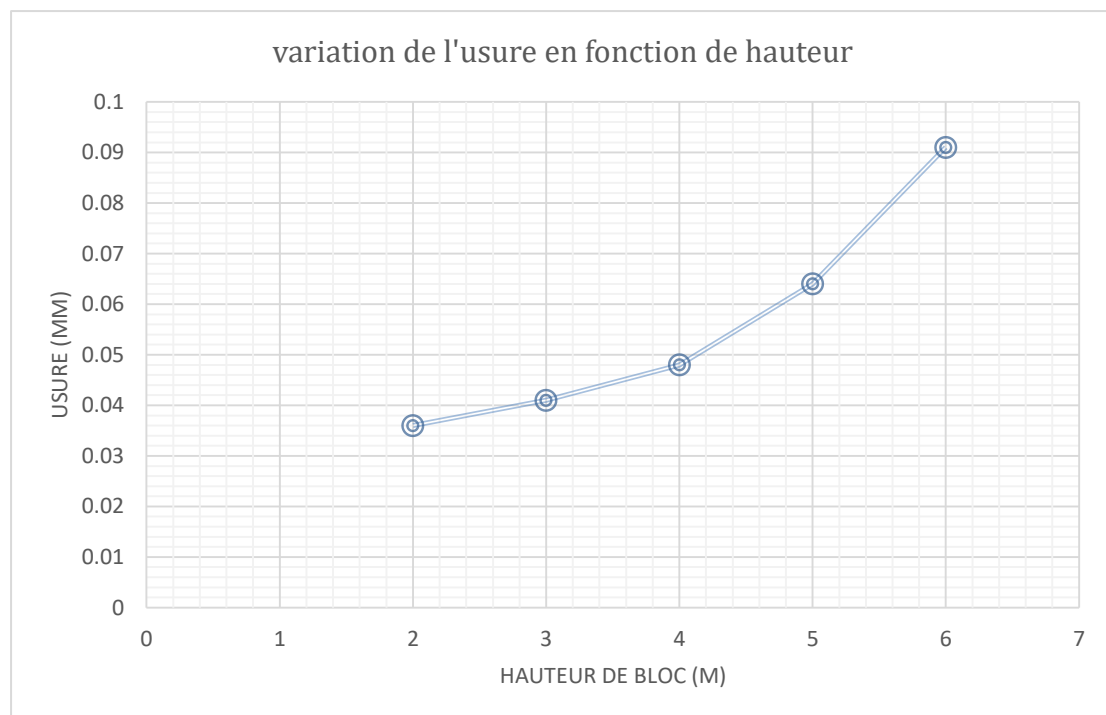


Figure 3.8 : Influence de la hauteur du gradin (H) sur l'usure du fil diamanté

3.3.3 Analyse d'impact de la hauteur du gradin

L'évaluation croisée des indicateurs électriques, mécaniques et tribologiques permet de sectoriser le comportement opérationnel de la machine au fil diamanté selon trois régimes :

- **Le comportement électrique et limites de puissance moteur :** L'évolution de l'intensité électrique lue sur la Figure 3.7 montre une hausse linéaire et maîtrisée jusqu'à $H = 4,0$ m, ($I = 59,0$ A), définissant la zone de confort électromécanique du système. Au-delà de ce seuil, le moteur principal entre en surcharge critique. À $H = 5,0$ m, l'intensité atteint 72,0 A, une valeur proche de la limite de déclenchement thermique. À $H = 6,0$ m, le courant s'emballe jusqu'à 88,0 A, franchissant le seuil critique d'asservissement du disjoncteur (75,0 A). Cette configuration provoque une rupture d'alimentation par surcharge électrique (disjonction).
- **La saturation hydrodynamique (Le défi hydraulique) :** Ces performances électriques sont intimement liées aux contraintes d'écoulement du fluide de refroidissement. Un débit constant de 0,5 L/s s'avère géométriquement insuffisant pour purger le trait de scie lorsque la hauteur excède 4,0 mètres. L'allongement de la trajectoire interne du fil empêche le fluide de pénétrer jusqu'au centre de la coupe. Privée d'un vecteur d'évacuation efficace, la suspension de particules de marbre s'épaissit pour former une pâte abrasive à haute viscosité.
- **La cinétique d'usure du fil :** La stagnation de cette boue chargée au cœur du canal de coupe modifie radicalement le régime d'usure (Figure 3.8). Le mélange agit comme un tiers corps abrasif qui décape prématurément la matrice liante des perles, entraînant une accélération de l'usure qui culmine à 0,09 mm pour $H = 6,0$ m. Bien que le rendement théorique semble augmenter (4,65 m²/h), cette hausse est économiquement non viable en raison du coût de remplacement précoce du câble diamanté.
- **Bilan de la phase II**

L'analyse conjointe des contraintes de puissance et de dégradation d'outil démontre que **la hauteur de $H = 4,0$ m constitue le seuil technologique optimal** pour l'exploitation de la carrière de Filfila.

Cette valeur représente le point d'équilibre idéal : elle maximise le rendement de coupe (3,57 m²/h) tout en maintenant l'intensité motrice (59,0 A) et l'usure du fil (0,05 mm) en deçà de leurs limites de tolérance industrielles.

3.4. Phase III : Évaluation de la stabilité opérationnelle sur de grandes surfaces

3.4.1. Paramètres et objectifs de l'essai

Cette troisième phase expérimentale vise à valider la robustesse et la stabilité à long terme des paramètres optimaux identifiés lors des phases précédentes (V_{opt} et H_{opt}). Il s'agit de s'assurer que le comportement du système ne subit pas de dérive thermique ou mécanique lors de cycles de sciage prolongés sur de grandes surfaces.

Les conditions opératoires sont standardisées comme suit :

- **Vitesse d'avance (Va) :** Constante et fixée à 1,0 m/h (optimum de la Phase I).
- **Hauteur du gradin (H) :** Constante et fixée à 4,0 m (optimum de la Phase II).
- **Débit de fluide de refroidissement (Q) :** Constant à 0,5 L/s.
- **Variable d'étude :** Surface totale de coupe (S), variant de 10 m² à 30 m² par incréments de 5 m² (ce qui correspond à un allongement de la largeur de coupe L de 2,5 à 7,5 mètres).
- **Validation de la stabilité à long terme :** L'objectif est de vérifier si les performances techno-économiques validées sur une surface standard de 10 m² se maintiennent de manière linéaire et fiable lors d'une sollicitation continue s'étendant jusqu'à 30 m².
- **Comportement électromécanique attendu :** D'un point de vue cinématique, la hauteur du front de taille (H=4,0 m) restant constante, l'arc de contact entre le fil et la roche demeure stationnaire. Par conséquent, aucune variation significative de l'intensité électrique du moteur principal n'est attendue, la puissance requise pour le découpage proprement dit restant stable dans le temps.

- **Contrôle cinématique et géométrique** : Cette phase déplace l'attention vers le comportement macroscopique de l'installation (châssis et système de rails de guidage). L'augmentation de la surface de coupe induit une course linéaire plus importante de la haveuse sur ses rails. Il convient d'évaluer si cette extension de trajectoire engendre des défauts de rectitude ou affecte la précision géométrique de la coupe.
- **Évaluation de la fatigue mécanique de l'équipement** : Compte tenu du cycle de vie avancé et de l'ancienneté des équipements de la carrière, cet essai prolongé (allant jusqu'à plus de 8 heures de sciage continu) fait office de test d'endurance. Une surveillance particulière est accordée à la fatigue vibratoire, à l'alignement des poulies de guidage et à l'apparition éventuelle de résonances parasites.

Objectif industriel final : La finalité de cet essai est de confirmer la robustesse des paramètres retenus afin de garantir une production continue à l'échelle industrielle, exempte de défaillances techniques imprévues ou de dégradations de la qualité marchande des blocs de marbre.

3.4.2. Tableau de synthèse des essais de la Phase III

Les indicateurs cinématiques, électriques et d'usure relevés au cours du sciage prolongé sur le marbre de Filfila sont récapitulés dans le Tableau 3.3.

Avant de présenter ces résultats, il est important de préciser la méthode de calcul de la largeur de coupe horizontale (L). Le sciage a été effectué sur un gradin de hauteur constante $H = 4$ m. En utilisant la relation géométrique de la surface rectangulaire $S = H \times L$ nous avons déterminé la largeur (L) pour chaque surface progressive (S) par la formule suivante :

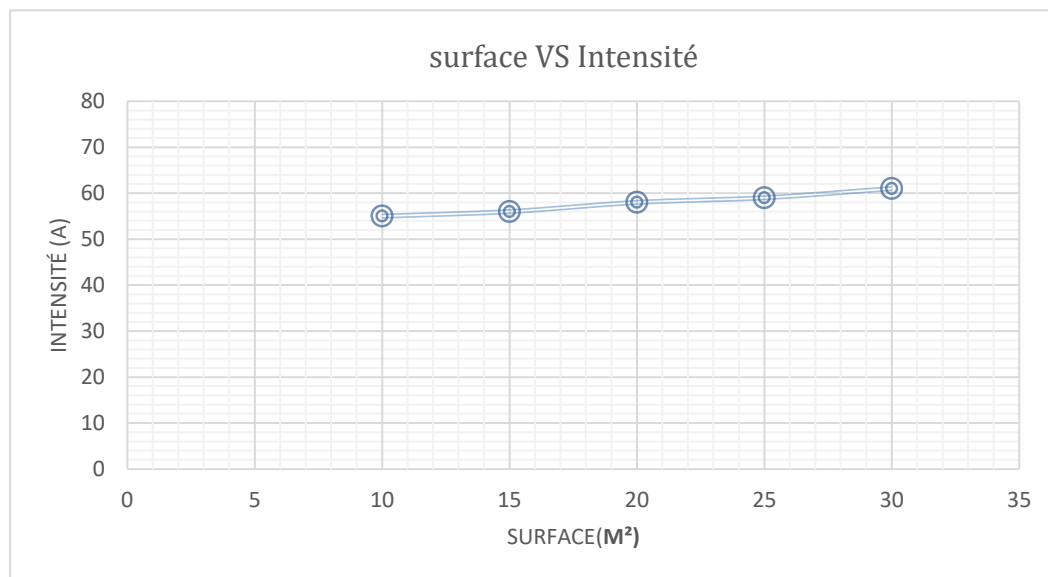
$$L = \frac{S}{H} \quad \Rightarrow \quad L = \frac{S}{4}$$

- ✓ Les valeurs ainsi calculées (et arrondies) pour l'ensemble des essais sont introduites dans la première colonne du tableau ci-dessous :

Tableau 3.3 : Données expérimentales du sciage en fonction de la surface de coupe (S)

Largeur L(m)	Surface S(m ²)	Temps T(min)	Intensité I(A)	Usure du fil(mm)	Rendement R(m ² /h)
2,5	10	162	55,0	0,04	3,70
3,7	15	241	56,0	0,06	3,73
5,0	20	326	58,0	0,08	3,68
6,3	25	412	59,0	0,11	3,64
7,5	30	504	61,0	0,13	3,57

- À partir de ce tableau on peut faire les courbes suivantes:

Figure 3.9 : Stabilité de l'intensité moteur sur une surface de coupe étendue (10 à 30 m²)

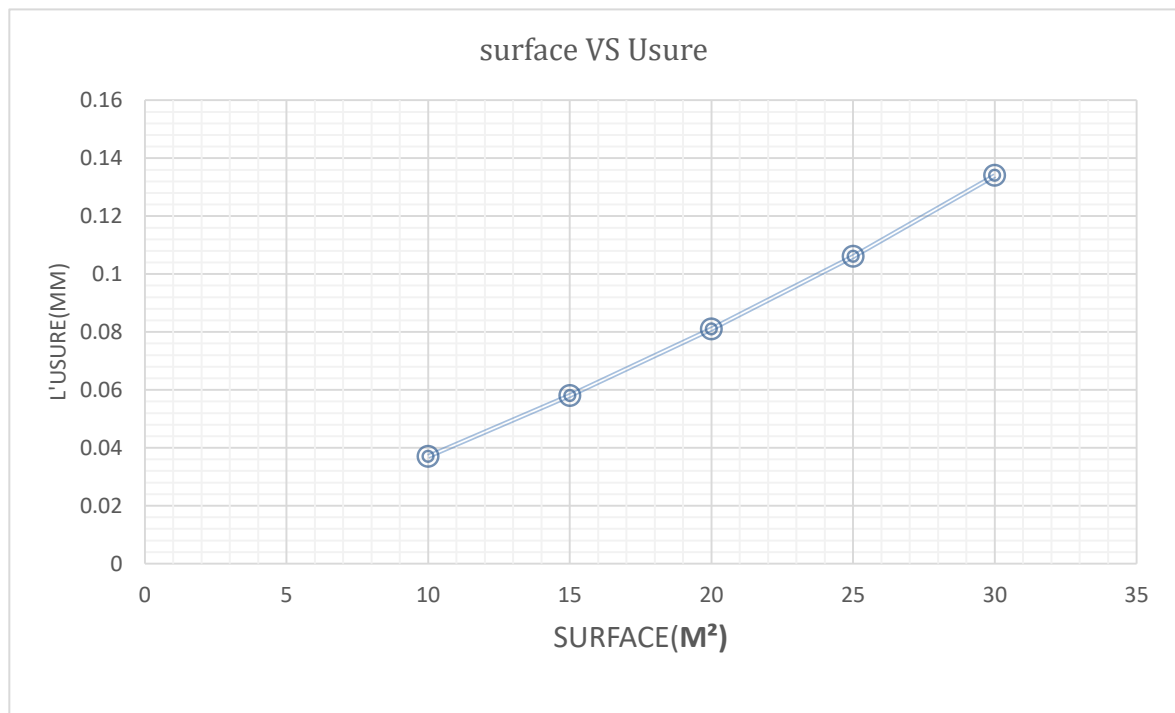


Figure3.10 : Évolution de l'usure cumulative du fil diamanté en fonction de la surface sciée

3.4.3. Analyse de l'impact de la géométrie de coupe

- **Stabilité électrique :** Contrairement aux essais de variation de hauteur, l'augmentation de la surface de sciage par l'allongement de la largeur n'entraîne pas de saturation du moteur principal. L'intensité absorbée demeure stable (entre **50 A** et **70 A**). Ce phénomène s'explique par la constance de l'arc de contact (longueur de fil engagée dans la roche), maintenu par la hauteur fixe de 4 mètres.
- **Cinétique de l'usure :** L'accroissement de l'usure observé sur le second graphique suit une logique strictement chronologique. Une passe de **30 m²** nécessitant environ **8h30** de fonctionnement continu, l'usure diamétrale des perles est directement proportionnelle au volume de roche abattu et au temps de friction.
- **Comportement mécanique :** Les essais confirment que le recul de la machine sur son chemin de roulement ne génère aucune contrainte dynamique parasite (vibrations harmoniques ou surcharges mécaniques). La machine Gamma 875 peut ainsi traiter de grandes longueurs de

coupe sans risque pour la motorisation, sous réserve de ne pas excéder la hauteur critique de **4 mètres**.

3.4.4. Transition : de la surface totale à la largeur optimale (L_{opt})

La relation géométrique fondamentale de la section de coupe est définie par ($S = H * L$)

Bien que l'aptitude machine permette des coupes plus larges, l'analyse croisée des performances techniques et des contraintes logistiques nous conduit à préconiser une largeur optimale ($L_{opt} = 2,5 \text{ m}$).

Justifications techniques:

1. **Stabilité du fil** : La limitation de la largeur à **2,5 m** réduit la flèche latérale du fil. Cette rigidité accrue prévient les déviations directionnelles et garantit une planéité rigoureuse des faces du bloc.
2. **Régime moteur optimal** : À cette largeur, l'intensité du courant se stabilise dans une plage de sécurité stricte (**55 A** à **61 A**), offrant une marge de manœuvre contre d'éventuelles hétérogénéités de la roche.
3. **Contraintes opérationnelles** : Sur le site de Filfila, des blocs d'une largeur de **2,5 m** correspondent au gabarit optimal pour les équipements de manutention et de transport, facilitant ainsi l'évacuation depuis le front de taille.

3.4.5. Synthèse de la surface de sciage optimisée

Au terme de cette phase expérimentale, nous définissons la section de coupe optimale comme le produit de la hauteur et de la largeur stabilisées lors de nos essais :

$$\text{Surface optimale (m}^2\text{)} = H \text{ optimale(m)} * L \text{ optimale(m)}$$

En appliquant les résultats de nos mesures in situ :

$$S \text{ total} = 4 * 2,5 = 10 \text{ m}^2$$

3.5. Phase IV : Optimisation du débit d'eau (Q)

3.5.1. Paramètres expérimentaux et protocole

Pour isoler l'influence du flux hydraulique, les paramètres optimisés lors des phases précédentes ont été maintenus constants :

- **Vitesse optimale (V_{opt})** = 1,0 m/h.
- **Hauteur optimale (H_{opt})** = 4,0 m.
- **Largueur optimale (L_{opt})** = 2,5 m.
- **Surface optimale** = 10 m²

L'objectif de cette phase est de déterminer le débit critique (Q) permettant de stabiliser l'intensité du courant (I) et de minimiser l'usure abrasive du fil en assurant une évacuation fluide du slurry (mélange eau + poudre de marbre).

Tableau 3.4 : Influence du débit d'eau sur les indicateurs de performance

Débit Q (L/s)	Temps (min)	Intensité I (A)	Usure (mm/m ²)	Rendement (m ² /h)
0,3	162	62	0,07	3,7
0,4	162	58	0,05	3,7
0,5	162	55	0,04	3,7
0,6	162	54	0,03	3,7

D'après le tableau (3.4) on trace les courbes suivantes

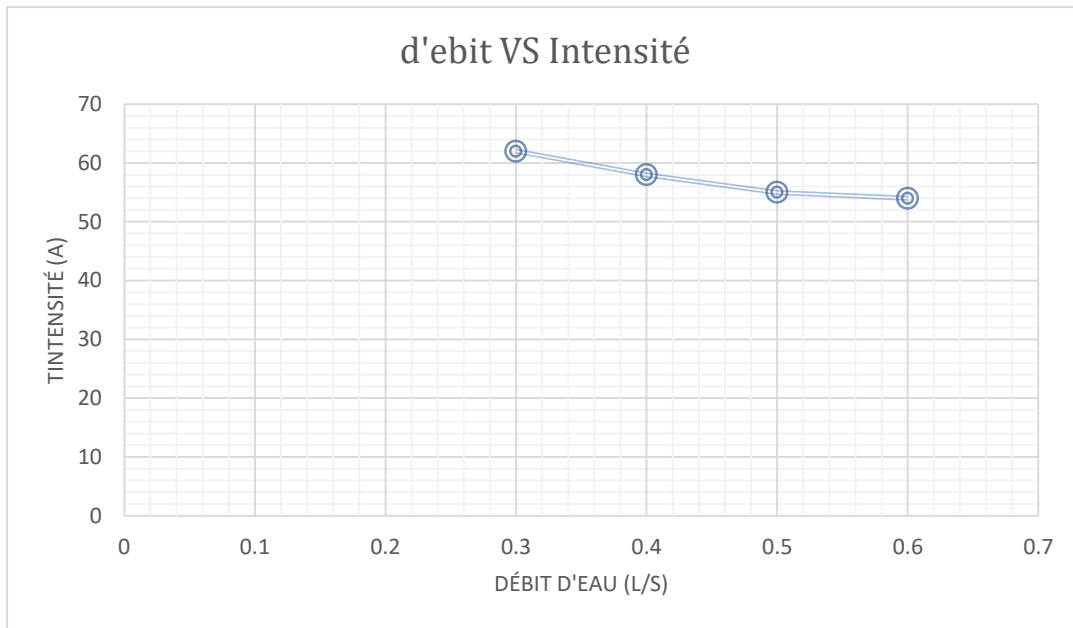


Figure 3.11 : Variation de l'intensité en fonction du débit

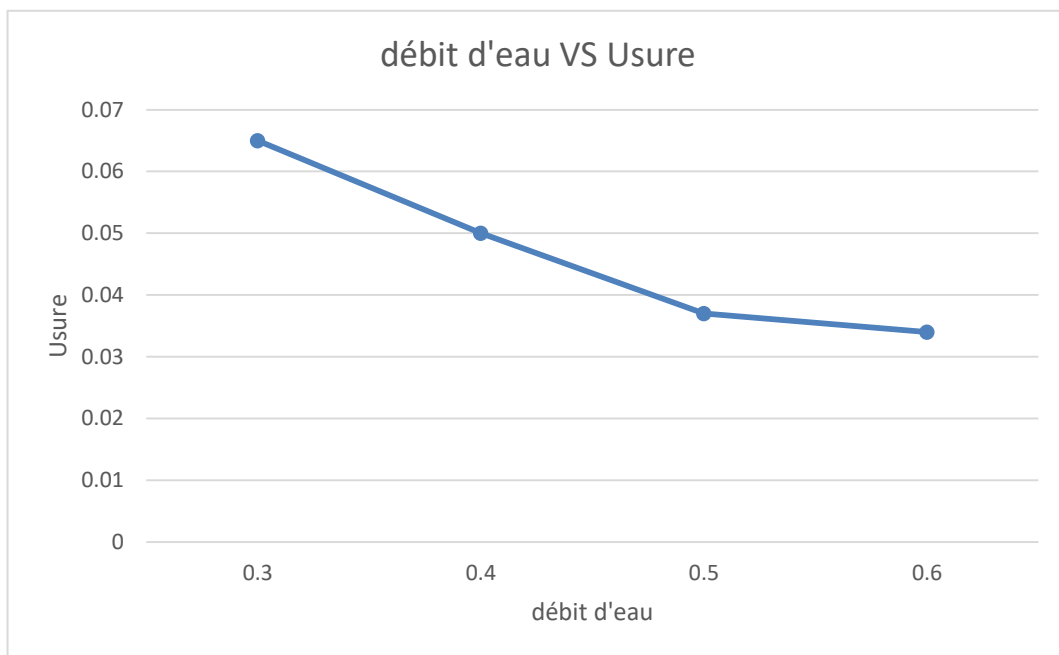


Figure 3.12 : Variation de l'usure en fonction du débit d'eau

Analyse des résultats:

- **Si Q appartient à [0,3 ; 0,4] L/s** : Le débit est insuffisant. La lubrification médiocre entraîne un échauffement des perles et une augmentation de la résistance au frottement, se traduisant par une intensité élevée (> 60 A) et une usure prématurée.
- **Si Q = 0,5L/s** : On observe une stabilisation du courant à **55 A**. C'est le point d'équilibre où l'évacuation des débris de coupe est optimale.
- **Si Q = 0,6 L/s** : L'amélioration de l'intensité est négligeable (1 A de gain). À ce stade, l'augmentation du débit constitue un gaspillage de ressource hydrique sans bénéfice technique significatif.

Conclusion : Le débit optimal est fixé à $Q_{opt} = 0,5$ L/s.

3.5.2. Corrélation avec le rendement de coupe (Productivité)

Pour établir une règle pratique universelle, il convient de lier ce débit à la surface réellement découpée par unité de temps. Le **taux de découpe (T_d)**, exprimant la surface nette produite par heure, est calculé comme suit [30] :

$$\begin{aligned}T_d &= V_{opt} \times H_{opt} \\ \Rightarrow T_d &= 1 \times 4 \\ T_d &= 4m^2/h\end{aligned}$$

Ce paramètre de 4,0 m²/h devient notre valeur de référence pour le pilotage de la machine Gamma 875 sur le site de Filfila.

3.5.3. Établissement de la règle de pilotage opérationnelle

L'objectif est de fournir aux opérateurs un abaque de décision. Plutôt que de saisir des valeurs empiriques, l'opérateur doit ajuster la vitesse d'avance (V_a) en fonction de la hauteur réelle du front de taille ($H_{réelle}$) pour maintenir le rendement optimal de 4,0 m²/h.

La formule de contrôle préconisée est :

$$Va = \frac{Td}{Hr\acute{e}elle} \quad (100)$$

Avantages de cette règle :

1. **Adaptabilité** : Elle permet de recalculer instantanément la vitesse de descente si la hauteur du bloc varie ou si le terrain présente une inclinaison.
2. **Stabilité Électromécanique** : En respectant cette consigne, la charge sur le moteur reste constante, évitant les pics d'intensité supérieurs à **61 A**.
3. **Efficience du refroidissement** : Elle garantit que le débit de **0,5 L/s** reste dimensionné pour le volume de boues généré par heure.

Remarque de synthèse : La vitesse de 1,0 m/h, initialement identifiée comme optimale pour la longévité du fil, est ici validée mathématiquement. Elle constitue le pivot de notre modèle de performance pour un bloc standard de 4 mètres de hauteur.

Ainsi, pour tout bloc de hauteur différente, la vitesse d'avance se recalcule automatiquement via la relation : $Va = 4 / H$. Par exemple, pour un bloc standard de 1,5 m, la vitesse préconisée sera $Va = 4 / 1,5 = 2,67$ m/h.

3.6. Synthèse opérationnelle : Abaque de pilotage de la Gamma 875

Ce tableau définit les réglages optimaux pour maintenir le **Taux de Découpe** à 4,0 m²/h, garantissant ainsi le meilleur compromis entre productivité, usure du fil et sécurité moteur.

Tableau 3.5 : Abaque de réglage (Cible Taux de Découpe = 4,0 m²/h)

Hauteur du front (H en m)	Vitesse d'avance préconisée (Va en m/h)	Débit d'eau cible (Q en L/s)	Intensité moteur visée (I en A)
2,0	2,0	0,5	55 - 58
2,5	1,6	0,5	55 - 58
3,0	1,3	0,5	55 - 58
3,5	1,1	0,5	55 - 58
4,0 (Standard)	1,0	0,5	55 - 61
4,5	0,9	0,6	58 - 62

Note technique : Au-delà de 4m de hauteur, une légère augmentation du débit d'eau (0,6 L/s) peut être envisagée pour compenser le trajet plus long du fil dans la roche et faciliter l'expulsion des boues.

Interprétation de l'abaque pour le mémoire

1. **Loi d'asservissement :** L'abaque illustre la relation inversement proportionnelle entre la hauteur H et la vitesse Va. Pour stabiliser la charge moteur, toute augmentation de la hauteur de coupe doit être compensée par une réduction de la vitesse d'avance : $V_a = \frac{4}{h}$
2. **Zone de sécurité :** La plage d'intensité **55 A - 61 A** constitué la "zone verte" de fonctionnement. Si l'intensité dépasse **65 A**, l'opérateur doit réduire Va de **10%** ou vérifier le débit d'eau.
3. **Gestion de l'usure :** En fixant le débit d'eau à **0,5 L/s**, on assure que la température des perles reste inférieure au seuil de vitrification, prolongeant ainsi la durée de vie du fil diamanté (longévité de l'outil).

3.6.1 Synthèse et Modélisation des Paramètres

Sur la base des résultats expérimentaux (optimisation de la vitesse, du débit et du rendement), nous avons élaboré un **modèle de pilotage unifié**. Cette approche permet de traduire les observations empiriques en un formalisme mathématique directement exploitable par les opérateurs sur site.

3.6.2 Mise en œuvre pratique et formalisme mathématique

- **Référence du Taux de Découpe (T_d) :** La valeur cible est fixée à 4,0 m²/h. Ce paramètre devient la variable de contrôle principale pour garantir que l'intensité moteur reste inférieure au seuil critique de **61 A**.
- **Bilan Thermique et Refroidissement :** Le débit optimal (Q_{opt}) est intrinsèquement lié à l'énergie thermique dissipée lors du frottement des perles sur la roche.

En génie minier, la chaleur dégagée augmente proportionnellement à la surface sciée par unité de temps ce qui nécessite un débit d'eau plus important.

Cela se traduit par l'équation : $Q = T_d \times C$ (101)

Où : **C** : coefficient de refroidissement spécifique. Coefficient de proportionnalité entre le débit d'eau et le taux de découpage

En substituant l'équation (100) dans l'équation (101) On obtient :

Établissement du coefficient de refroidissement spécifique (C) :

Partant du principe de refroidissement par flux continu, nous avons :

$$Q_{opt} = C \times (V_a \times H_{réel})$$

D'après nos essais $Q_{opt} = 0,5$ L/s pour $T_d = 4$ m²/h), nous extrayons le coefficient **C**:

$$C = \frac{0,5}{4} = 0,125 \text{ (L/s) / (m}^2\text{/h)}$$

Équation d'Asservissement du Débit d'Eau [31] :

$$Q_{opt} = 0,125 \times (V_a \times H)$$

- Q_{opt} : Débit d'eau cible ; L/s.
- **0,125** : coefficient de refroidissement spécifique (établi pour le marbre de Filfila).
- **Va x H** : Taux de découpe instantané m²/h.

Règle de gestion du Slurry : Un déficit hydrique transforme la poussière de marbre en une pâte abrasive dense augmentant la friction. À l'inverse, un excès de débit peut provoquer un phénomène d'aquaplaning du fil, réduisant l'efficacité de l'abrasion.

3.6.3 Analyse comparative des approches

Le tableau suivant synthétise les gains technologiques apportés par le modèle d'optimisation proposé par rapport aux pratiques actuelles.

Tableau 3.6 : Analyse comparative entre l'approche actuelle et le modèle d'optimisation

L'approche Data-driven est expliquée en Annexe A1

Base de comparaison	Approche Actuelle	Modèle Scientifique Proposé	Impact de l'Optimisation
Contrôle de la vitesse (V_a)	Évaluation subjective selon l'expérience de l'ouvrier.	Régulation dynamique : $V_a = T_d / H$.	Standardisation du cycle et réduction de l'erreur humaine.
Régulation du débit (Q)	Ouverture aléatoire des vannes (observation visuelle).	Dosage de précision par la formule d'asservissement.	Refroidissement spécifique et évacuation fluide du slurry.
Stabilité électrique (I)	Charge instable avec pics fréquents (> 61 A).	Maintien d'une charge constante en zone de sécurité.	Protection des composants et réduction des pannes.
Dynamique du fil	Flèche importante et variations de pression.	Tension constante et respect de la linéarité du trait.	Réduction des ruptures et de la vitrification des perles.
Gestion des ressources	Consommation d'eau excessive et usure hétérogène.	Rationalisation des flux et longévité accrue du diamant.	Réduction des coûts opératoires (OPEX).
Aide à la décision	Basée sur l'intuition individuelle.	Basée sur un modèle mathématique reproductible.	Passage à un système piloté par les données (<i>Data-driven</i>).

3.6.4 Discussion des résultats

L'analyse comparative démontre une amélioration structurelle du processus d'extraction. En remplaçant l'intuition par des paramètres calculés, nous stabilisons le point de fonctionnement de la **Gamma 875**.

La précision du débit, dictée par le coefficient **0,125**, assure non seulement l'intégrité thermique du fil, mais optimise également l'évacuation des débris rocheux. Il en résulte une meilleure planéité des blocs et une augmentation de la durée de vie des perles, constituant un gain économique direct pour l'exploitation de Filfila.

Conclusion

L'étude expérimentale menée au cours de ce chapitre a permis de poser les repères d'une exploitation rationnelle pour la carrière de **Filfila**. En partant d'un audit de terrain révélant une gestion empirique et souvent approximative des paramètres de coupe, nous avons identifié les leviers d'optimisation indispensables à la stabilisation de la production.

L'application rigoureuse du protocole **OFAT** (*One Factor At A Time*) a été déterminante pour isoler l'influence intrinsèque de chaque variable opératoire. Les résultats obtenus valident qu'un **rendement cible de 4 m²/h**, corrélé à l'application du **coefficient de refroidissement spécifique (0,125)**, constitue le point d'équilibre optimal entre la productivité industrielle et la préservation de l'intégrité de l'outil.

En définitive, les équations de pilotage proposées V_a et Q transcendent le cadre purement théorique pour former un **protocole technique opérationnel**. Leur mise en œuvre systématique permet de :

- **Sécuriser l'actif matériel** en prémunissant le moteur contre les surcharges électriques (maintien de l'intensité sous le seuil critique de 61 A) ;
- **Uniformiser l'usure du fil diamanté**, prolongeant ainsi sa longévité par la maîtrise des contraintes thermomécaniques ;
- **Standardiser la production**, assurant une qualité de coupe constante.

Cette méthode répond ainsi aux exigences de performance technique et de rentabilité économique fixées au seuil de ce travail, transformant une pratique artisanale en un processus industriel piloté par la donnée.

CHAPITRE 4

PARTIE ÉCONOMIQUE

Introduction

Ce chapitre constitue le volet économique de notre étude technique. Il vise à évaluer de manière quantitative l'impact de l'optimisation des paramètres de coupe sur la rentabilité de l'exploitation. Après avoir validé techniquement le **taux de découpe cible** ($R_s=4 \text{ m}^2/\text{h}$), il est impératif de traduire ces gains de performance en indicateurs de profitabilité pour le site de **Filfila**.

À travers une analyse comparative entre l'approche actuelle et le modèle fondé et optimisé, nous démontrerons comment l'ingénierie des procédés influence directement la structure des coûts de l'entreprise **ENAMARBRE**. L'objectif final est de prouver que la précision mathématique et la stabilisation des paramètres ne sont pas seulement des impératifs techniques, mais des leviers stratégiques pour réduire les pertes matérielles et maximiser la marge nette de production.

4.1. Choix du cadre d'étude : Le bloc marchand

Afin d'assurer une comparaison financière rigoureuse et cohérente, nous avons défini un **bloc de référence de 1,5 m de hauteur**. Ce choix méthodologique repose sur trois piliers fondamentaux :

- **Représentativité Statistique (Valeur Moyenne)** : Sur le site de Filfila, les hauteurs de découpe oscillent généralement entre **1,2 m** (petits blocs) et **1,8 m** (blocs massifs). La valeur de **1,5 m** représente ainsi une moyenne pondérée fidèle à la production quotidienne, permettant de stabiliser les projections économiques.
- **Pertinence Commerciale (Réalité de Terrain)** : Cette dimension correspond au standard des blocs dits "marchands" ou "commerciaux" produits par ENAMARBRE. En étudiant cette unité de référence, nous pouvons calculer une marge bénéficiaire directement applicable au produit fini destiné au marché.
- **Neutralisation des Variables Géologiques (Précision Technique)** : Fixer une hauteur de référence permet d'isoler l'impact réel des variables optimisées (**Va, Td, Q**) en éliminant les fluctuations liées aux variations géométriques et géologiques du front de taille. Cela garantit que les gains observés sont exclusivement attribuables à l'amélioration du protocole de sciage [28]

4.1.1. Détermination des coûts d'exploitation

L'exploitation quotidienne de la machine **Benetti Gamma 875** génère des charges opérationnelles spécifiques qui doivent être quantifiées pour évaluer la rentabilité. Cette section répertorie l'ensemble des ressources matérielles, énergétiques et humaines nécessaires à la réalisation d'un cycle de découpe complet.

Afin d'obtenir une précision analytique, nous classons ces dépenses en trois catégories principales permettant de déterminer le **coût de revient unitaire au mètre carré (DA/m²)**.

4.1.2 Consommation et valorisation du fil diamanté

Le fil diamanté constitue le poste de dépense le plus significatif du processus d'extraction sur le site de Filfila. Son coût d'exploitation n'est pas seulement fonction du prix d'achat, mais dépend intrinsèquement de la **durée de vie utile** des perles et de la résistance du câble.

A. Calcul du coût d'usure spécifique

Nous utilisons la formule suivante pour isoler le coût d'amortissement de l'outil diamanté par unité de surface produite :

$$C_{USURE} = \frac{P_{Fil} \times L_{usée}}{S_{sciée}}$$

Où :

C_{USURE} : Coût d'usure par mètre carré découpée en DA/m².

P_{Fil} : Prix d'achat du mètre linéaire de fil diamanté en DA/m.

$L_{usée}$: Longueur totale de fil consommée ou engagée durant l'opération (m).

$S_{sciée}$: Surface nette de marbre découpée exprimée en m².

- Sur le terrain, la méthode appliquée actuellement entraîne fréquemment la rupture soudaine du câble porteur de 10,5 mm, ce qui augmente les pertes matérielles et les coûts d'exploitation.
- Afin de réduire ces pertes, les opérateurs récupèrent les parties encore utilisables du fil diamanté pour fabriquer un fil recyclé, utilisé ensuite dans le sciage des petits blocs au sein de ENAMARBRE. [29]

B. Analyse des pertes et stratégie de recyclage

L'observation des pratiques actuelles sur le site de Filfila met en évidence deux phénomènes majeurs :

- **Incidence des ruptures** : Dans l'approche actuelle, l'instabilité des paramètres (V_a et I) provoque fréquemment la rupture soudaine du câble porteur de 10,5 mm. Ces arrêts non programmés augmentent radicalement le coût d'exploitation en réduisant prématurément la durée de vie du fil.
- **Valorisation par recyclage** : Pour atténuer l'impact financier des ruptures, l'entreprise **ENAMARBRE** applique une stratégie de récupération. Les segments de fil dont les perles présentent encore un diamètre diamanté suffisant sont réassemblés. Ce "fil recyclé" est réaffecté au sciage de blocs de moindres dimensions ou de qualité secondaire, permettant ainsi d'optimiser le taux d'utilisation de l'outil jusqu'à son épuisement total.



Figure 4.1 : Processus de recyclage des segments de fil

4.1.3 Coût de l'Énergie électrique et du système de Pompage

Le fonctionnement de la machine **Benetti Gamma 875** repose sur une alimentation électrique stable, dont la gestion des coûts est un levier de rentabilité majeur. Conformément aux factures fournies par l'entreprise **ENAMARBRE** (consultables en annexe), nous appliquons le tarif industriel en vigueur de **5,48 DA/kWh** (Sonelgaz).

A. Formulation du coût énergétique global

Le coût énergétique total (C_e) ne se limite pas à la consommation propre de la machine de coupe ; il intègre également l'énergie nécessaire à l'alimentation en eau du. Il est déterminé par l'équation suivante :

$$C_e = (P_m + P_p) \times 5.48 \times t$$

Où :

C_e : Coût énergétique total de l'opération en (DA).

P_m : Puissance moyenne réellement absorbée par le moteur principal de la machine (kW).

P_p : Puissance électrique consommée par la station de pompage (kW).

t : Durée totale de l'opération de sciage exprimée (heures).

- Les factures officielles de Sonelgaz, présentées en annexe, ont été utilisées pour confirmer les données liées aux dépenses énergétiques.
- L'amélioration du rendement à 4 m²/h permet de réduire le temps de fonctionnement des moteurs, ce qui diminue la consommation d'électricité et allège la facture énergétique globale de l'usine de Filfila [3]

B. Impact de l'optimisation sur la consommation

L'analyse de cette équation met en évidence une corrélation directe entre le rendement de coupe et la dépense énergétique :

- **Réduction du temps d'exposition (t) :** L'amélioration du rendement à 4 m²/h permet de réduire significativement le temps de fonctionnement des moteurs pour une même surface découpée [30]

- **Efficiencce énergétique** : Moins de temps de fonctionnement signifie une baisse de la consommation d'énergie réactive et active, ce qui allège la facture énergétique globale de l'unité de **Filfila**.
- **Maintenance indirecte** : Une utilisation optimisée et plus courte des moteurs limite l'échauffement des composants électriques, prolongeant ainsi leur durée de vie et réduisant les coûts de maintenance préventive.

4.1.4. Coût de la Main-d'œuvre Directe

Cette partie concerne les dépenses liées au personnel technique chargé de faire fonctionner la machine Benetti Gamma 875 sur le site de Filfila.

La conduite d'une scie à fil diamanté exige une équipe qualifiée capable de superviser les paramètres de coupe, d'assurer la maintenance de premier niveau et de garantir le respect des protocoles de sécurité.

A. Évaluation du coût salarial

Le coût de la main-d'œuvre C_m est indexé sur la durée effective de l'opération. Il est calculé selon la formule suivante :

$$C_m = (N \times T_h) \times t$$

Où :

- La formule appliquée est la suivante :

Les variables de cette équation correspondent aux définitions suivantes :

C_m : Coût total de la main-d'œuvre (DA)

N : Nombre d'opérateurs affectés à l'opération de sciage

T_h : Taux horaire par ouvrier (DA/h)

t : Durée totale de l'opération exprimée (heures)

B. Optimisation de la ressource humaine

Le passage à un rendement de 4 m²/h induit une **optimisation du temps de travail**. Pour une surface de marbre constante, la réduction de la durée de sciage (t) diminue mécaniquement la charge salariale unitaire. Cela permet à **ENAMARBRE** de libérer du temps de travail pour d'autres tâches productives au sein de la carrière (préparation des fronts de taille, manutention), augmentant ainsi la productivité globale du personnel.



Figure 4.2 : Équipe technique d'exploitation lors d'une phase de supervision sur le site de Filfila.

4.1.5. Structure et synthèse des dépenses opérationnelles (OPEX)

Cette partie concerne les données financières précédemment analysées afin d'offrir une vision globale de la structure des coûts d'exploitation sur le site.

L'analyse comparative des différents postes met en évidence la prépondérance du **fil diamanté** dans le coût de revient total, devant les dépenses énergétiques et la main-d'œuvre. Cette

répartition confirme que la stratégie d'optimisation de **ENAMARBRE** doit prioritairement se focaliser sur la longévité de l'outil diamanté.

Tableau 4.1 : Répartition type des coûts d'exploitation

Poste de dépense	Influence sur le coût total (%)	Sensibilité à l'optimisation
Fil Diamanté	Haut (60-70%)	Critique (dépend de V_a et Q)
Énergie Électrique	Moyen (15-20%)	Directe (dépend du temps t)
Main-d'œuvre	Faible (10-15%)	Indirecte (productivité horaire)

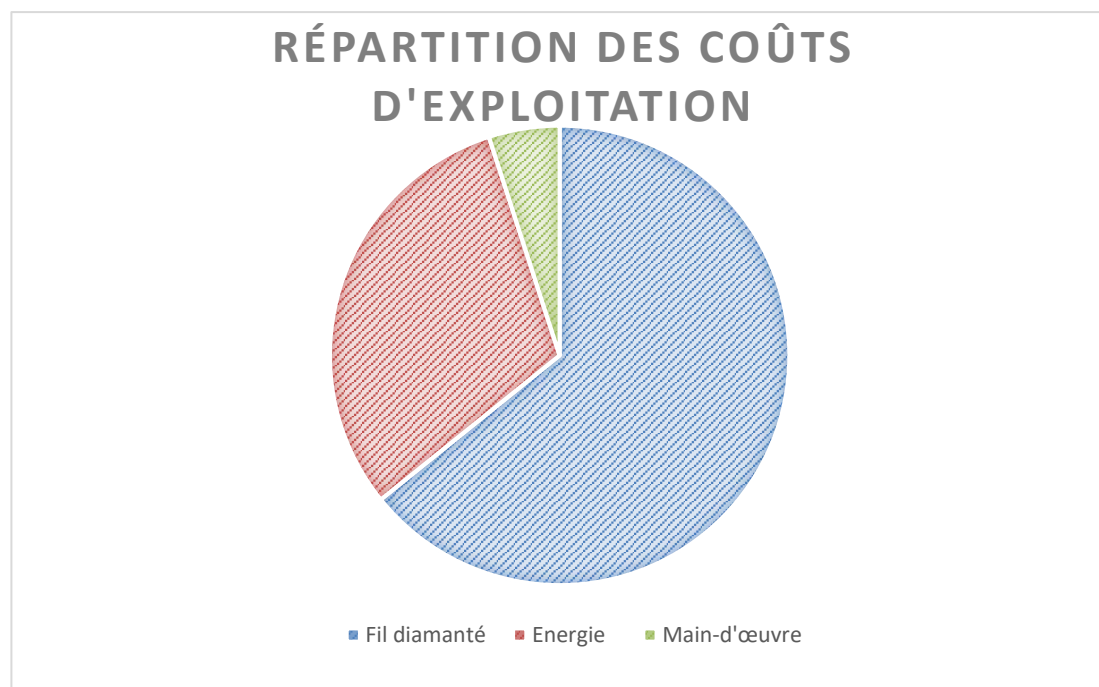


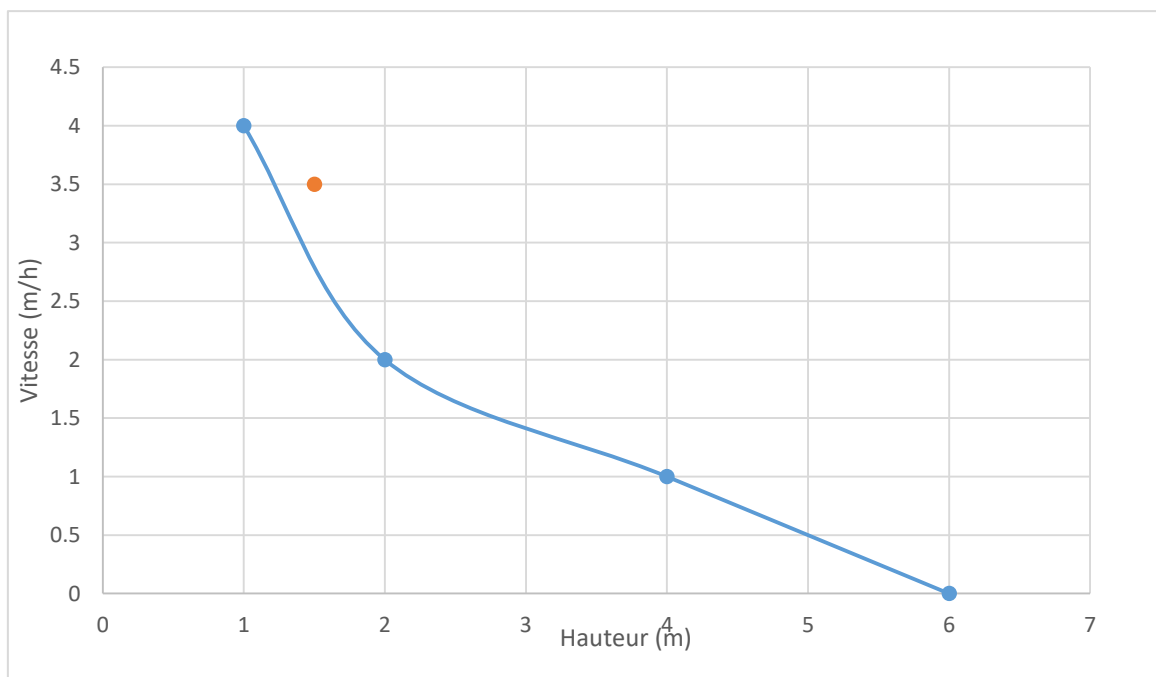
Figure 4.3 : Répartition des Coûts d'Exploitation (Diagramme circulaire mettant en évidence le poids du fil diamanté).

4.2 Analyse Financière de l'Approche conventionnelle

Cette partie examine les conséquences financières liées aux méthodes de travail conventionnelles (empiriques) pratiquées sur le site de Filfila. L'analyse repose sur un audit des phases de production réelle, où les choix techniques des opérateurs ne s'appuient pas encore sur un modèle fondé pour la maîtrise des coûts d'exploitation.

4.2.1 Évaluation des Paramètres de Sciage Actuels

- Le rendement de sciage est exprimé en m^2/h et dépend directement de la hauteur du massif ainsi que de la vitesse d'avance du fil diamanté. Même si une production plus rapide paraît avantageuse, elle reste limitée par les capacités du moteur de la machine Benetti Gamma 875 et les contraintes de sécurité.
- Les essais réalisés sur le site de Filfila montrent qu'un fonctionnement optimal est atteint autour de $4 \text{ m}^2/\text{h}$, avec une intensité inférieure à 61 A, ce qui garantit un équilibre entre performance et stabilité technique.



.

Figure 4.4 : Courbe de pilotage théorique et positionnement du point critique conventionnelle

- Comme il est illustré sur la Figure 4.4, nous avons tracé la courbe de pilotage théorique qui représente la vitesse d'avance du fil (V_a) en fonction de la hauteur du massif
- **Le point orange** tracé sur la courbe représente le point critique conventionnel (**Coordonnées : $H=1,5m$ et $V_a = 3,5 m/h$**), Ce point marque la frontière de la zone de sécurité électromécanique de la machine.
- En revanche, l'approche conventionnelle adoptée sur le terrain conduit parfois à des vitesses excessives (jusqu'à $5,25 m^2/h$), provoquant une surcharge thermique, une usure accélérée du fil diamanté et un risque accru de rupture, ce qui justifie une meilleure régulation des paramètres par ENAMARBRE.

En conclusion, cette absence de régulation fondée chez **ENAMARBRE** transforme un gain de temps apparent en une perte financière réelle, due à l'augmentation des arrêts de production et au remplacement prématuré des outils diamantés.

4.2.2 Analyse de l'Écart de Performance et Impact Thermique

Le graphique (figure 4.4) illustre l'écart entre la pratique sur le terrain et les limites théoriques de la machine Benetti. L'écart visible entre le point expérimental et la courbe de sécurité correspond à une augmentation de 31 % de la charge mécanique.

Cette sollicitation excessive du moteur entraîne une série de conséquences techniques et financières critiques sur le site de FILFILA.:

- **Surcharge électrique et thermique** : L'intensité du courant dépasse le seuil de 61 Ampères préconisé par le constructeur. Ce régime hors-norme provoque un échauffement par effet Joule au sein des enroulements du moteur, accélérant le vieillissement des isolants.
- **Déficit de refroidissement** : La chaleur générée ne peut pas être évacuée par le très faible débit d'eau de 0.3 L/s. Ce refroidissement insuffisant entraîne une vitrification des perles diamantées, réduisant leur pouvoir abrasif.
- **Fatigue Mécanique et Rupture** : Le fil diamanté de **10,5 mm** opère alors dans une zone de contraintes extrêmes. La fatigue cyclique du câble porteur mène inévitablement à des ruptures soudaines, immobilisant la production et augmentant le coût de maintenance curative.

Par conséquent, la maîtrise des coûts d'exploitation exige le respect strict d'une courbe de productivité de 4 m²/heure. Cette précision dans les calculs est indispensable pour garantir la durée de vie des billes et assurer le retour sur investissement des équipements pour la société ENAMARBRE.

4.2.3 Évaluation de la Dégradation par Cycle de Coupe

Pour quantifier les pertes liées aux contraintes thermiques, nous avons établi un indicateur d'usure basé sur l'évolution du diamètre des perles. Le diamètre initial d'un fil neuf est de **10,48 mm** (usure 0 %). Le seuil de déclassement, où le fil devient inutilisable et non recyclable, a été mesuré à **8,17 mm**.

Cette différence de **2,31 mm** représente le "capital diamanté" utile de l'entreprise **ENAMARBRE**. L'analyse comparative sur un bloc de référence de **1,5 m** révèle une disparité majeure dans la consommation de ce capital selon la méthode choisie.

A. Définition des seuils d'usure

Le tableau suivant synthétise les états de référence utilisés pour nos calculs :

Tableau 4.2 : Seuils d'usure du fil diamanté (Site de Filfila)

État du fil diamanté	Diamètre mesuré (mm)	Pourcentage d'usure
Fil neuf (Référence)	10,48	0 %
Fil usé (Seuil critique)	8,17	100 %



Figure 4.5 : Mesure au pied à coulisse numérique de l'évolution diamétrale d'une perle (neuve vs fin de vie).

4.2.4. Méthodologie de Valorisation des Écarts de Performance

Afin de quantifier l'impact de l'optimisation, nous avons appliqué une méthodologie de calcul comparative basée sur les indicateurs de performance industrielle (KPI). L'évaluation des gains repose sur le calcul des taux de variation et des rapports d'efficacité entre l'état initial (conventionnel) et l'état futur (optimisé) [31]

A. Calcul du Taux de Variation (Vitesse et Usure)

Pour mesurer l'évolution de la vitesse d'avance (V_a) et de l'usure diamétrale, nous utilisons la formule du taux de croissance relatif :

$$\tau = [(V_f - V_i) / V_i] \times 100$$

Où :

- V_f : Valeur finale (optimisée).
- V_i : Valeur initiale (conventionnelle).

B. Ratio de Consommation du Capital Diamanté

Le facteur de sollicitation du matériel est déterminé par le rapport de proportionnalité entre les deux consommations de matière. Ce ratio permet de mettre en évidence la vitesse de dégradation de l'outil :

$$T_d = (\% \text{ Usure conventionnelle}) / (\% \text{ Usure optimisée})$$

Ce coefficient multiplicateur (x 4,7) exprime combien de fois la méthode actuelle est plus abrasive pour le matériel par rapport à la solution préconisée.

C. Projection de la Longévité Opérationnelle

La durée de vie théorique du fil (L), exprimée en nombre de blocs, est calculée par le rapport entre le capital diamanté total (100%) et l'usure unitaire par cycle (U_{bloc}) :

$$L = 100 / U_{\text{bloc}}$$

D. Analyse comparative de la consommation du matériel

Les relevés effectués sur le terrain permettent de dresser le constat suivant :

Le 'capital diamanté' utile est défini par la différence entre le diamètre neuf (10,48 mm) et le seuil critique d'usure (8,17 mm), soit 2,31 mm.

Tableau 4.3 : Tableau comparatif de la consommation du matériel

Paramètres d'analyse	Approche Conventionnelle	Approche Optimisée	Écart / Gain
Vitesse d'avance (V _a)	3,50 m/h	2,67 m/h	- 23,7 %
Usure diamétrale / bloc	0,24 mm	0,05 mm	- 79,2 %
Consommation capital	10,4 %	2,2 %	x 4,7 moins
Longévité (en blocs)	~ 9,6 blocs	~ 45,4 blocs	+ 370 %

En conclusion, cette absence de régulation fondée chez ENAMARBRE transforme un gain de temps apparent en une perte financière réelle. La méthode conventionnelle sollicite le câble près de cinq fois plus rapidement que la solution optimisée. L'optimisation n'est donc pas une accélération de la production, mais une préservation drastique de l'outil de production.

4.2.5. Impact de l'Approche Conventionnelle sur les Coûts Opérationnels

Cette section visualise l'impact économique critique des méthodes conventionnelles ou empiriques. La consommation de **10,4 %** du capital diamanté par cycle engendre une inflation des coûts de production, principalement portée par la dépréciation accélérée de l'outil.

- **Investissement Matériel** : Sur la base d'un prix d'achat de **2 500 DA/m**, l'acquisition d'une couronne standard de 50 mètres représente un investissement de **125 000 DA**. Dans le modèle actuel, la dégradation prématurée du fil impose un cycle de renouvellement très court, ce qui oblige l'entreprise à renouveler fréquemment le fil diamanté à cause de sa dégradation accélérée.
- **Charges Énergétiques** : Le fonctionnement du moteur en régime de surcharge (**98 A**) induit une consommation électrique excessive. Facturée à **5,48 DA/kWh** par Sonelgaz, cette surconsommation, cumulée aux pertes thermiques, dégrade directement la marge opérationnelle du site de **Filfila**.

Tableau 4.4 : Synthèse des charges d'exploitation avant optimisation

Poste de dépense	Indicateur observé	Incidence sur l'exploitation
Fil diamanté	10,4 % d'usure par bloc	Renouvellement prématuré de l'outil
Achat du câble	2 500 DA / mètre linéaire	Immobilisation fréquente de trésorerie
Énergie (Sonelgaz)	5,48 DA / kWh	Surcharge électrique (98 A)
Main-d'œuvre	~ 35 000 DA / mois / op.	Rendement global sous-optimal

Cette partie concerne la démonstration de la rentabilité du modèle théorique proposé. Face aux pertes financières identifiées précédemment, l'application des paramètres optimisés vise à quantifier précisément les économies d'échelle réalisées par l'entreprise **ENAMARBRE**.

L'approche adoptée cible un **optimum de production**. Il s'agit de définir le point d'équilibre entre la cadence de découpe et la pérennité des équipements de production. L'enjeu est double

1. **Réduction des charges directes** (consommables et énergie).
2. **Amélioration de la disponibilité opérationnelle** de la machine en minimisant la maintenance curative.

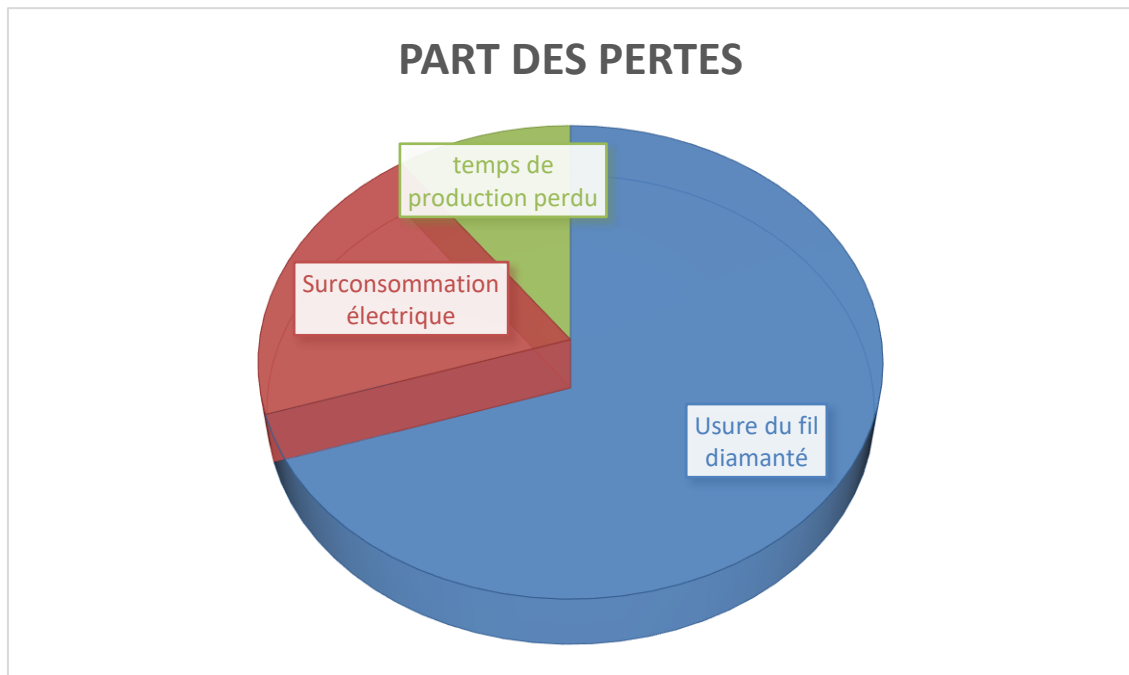


Figure 4.6 : Répartition analytique des pertes financières induites par la méthode conventionnelle (actuelle).

4.3 Analyse Financière du Modèle Optimisé

Cette section démontre la rentabilité du modèle proposé. Après avoir constaté les pertes financières critiques de la méthode conventionnelle (empirique), nous appliquons ici nos paramètres optimisés. L'objectif est de chiffrer exactement les gains réalisés sur le matériel et l'énergie pour l'entreprise ENAMARBRE. L'optimisation vise à trouver le point d'équilibre parfait entre la production et la préservation des équipements.

4.3.1 Application des Nouveaux Paramètres de Coupe

Le passage à une gestion industrielle rigoureuse exige d'abandonner la vitesse agressive de 3,5 m/h. Pour un bloc standard de 1,5 m de hauteur, notre étude impose une vitesse d'avance réduite à 2,67 m/h. Ce réglage spécifique permet de respecter strictement le rendement de sécurité de 4 m²/h. L'application de ce modèle apporte trois avantages majeurs, déjà démontrés dans notre bilan technique précédent :

- **Préservation du capital matériel** : L'usure physique des perles chute remarquablement de 0,24 mm à seulement 0,05 mm par coupe. Le taux de dégradation passe de 10,4 % à un niveau très faible de 2,2 % par bloc.
- **Optimisation du régime électrique** : Le moteur quitte sa zone de fatigue extrême (**98 A**) pour se stabiliser à **55 A**. Cette réduction de **44 %** de l'intensité garantit un fonctionnement fluide de la machine Benetti et prolonge la durée de vie des composants électriques.
- **Continuité de la production** : La baisse de la charge thermique évite les pannes et augmente la productivité réelle.

4.3.2 Analyse du Coût d'Usure du Fil sur la Boucle de Travail

Pour évaluer le coût d'usure nous devons isoler la boucle de fil réellement installée sur la machine pour un bloc de 1.5 mètre. Cette boucle mesure 7 mètres de long. À un prix de 2500.00 DA par mètre l'investissement total pour cet outil de coupe est de 17500.00 DA.

L'usure financière se calcule en appliquant nos taux de dégradation à cette longueur spécifique :

- **Méthode conventionnelle** : Le taux d'usure relevé est de 10.4 % par bloc. Sur une boucle de 7 mètres cela représente une perte physique équivalente à 0.728 mètre de fil. Le coût financier de cette dégradation est donc de 1820.00 DA par coupe.
- **Méthode optimisée** : L'abaissement de l'intensité à 55 A fait chuter l'usure à 2.2 % par bloc. La perte physique n'est plus que de 0.154 mètre de fil. Le coût d'usure s'effondre à 385.00 DA par coupe.

Notre modèle permet donc d'économiser 1435.00 DA de consommable à chaque équarrissage d'un bloc de 1.5 mètre.

Tableau 4.5 : Bilan des économies directes sur la consommation du fil diamanté

Paramètre financier	Méthode conventionnelle	Méthode optimisée
Taux d'usure par bloc	10.4 %	2.2 %
Coût du fil par coupe (DA)	1820.0 DA	385.0 DA
Gain financier net (DA)	0 DA	+ 1435.0 DA par bloc

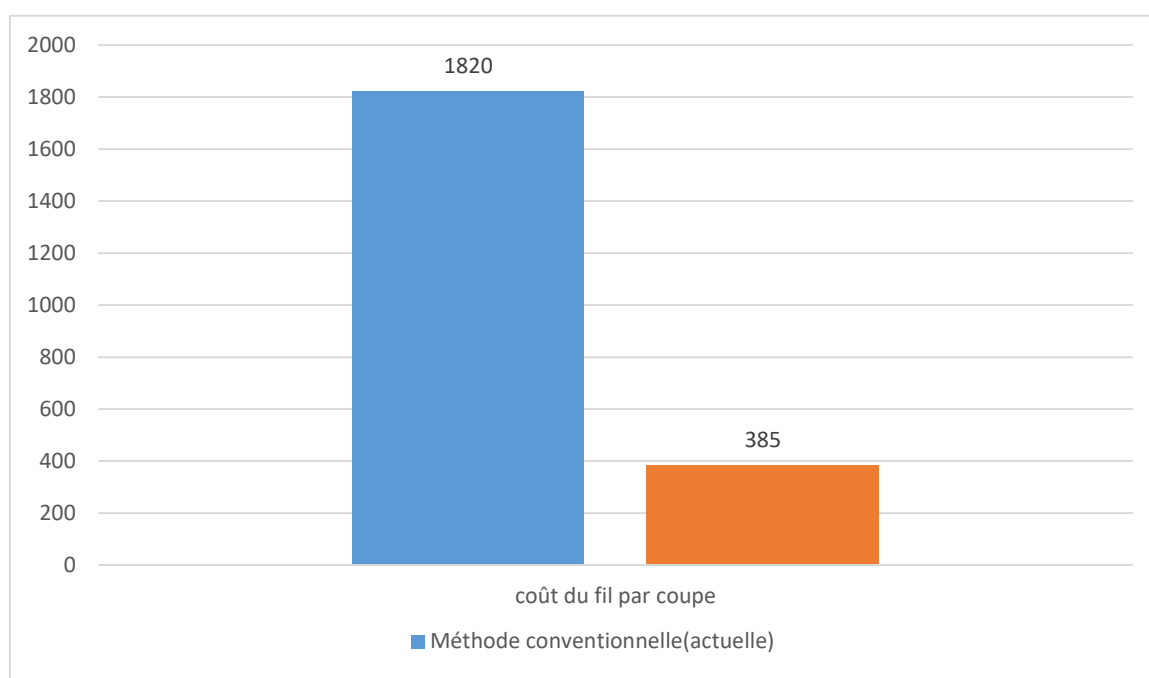


Figure 4.7 : Comparaison des coûts d'usure du fil diamanté par bloc (DA)

4.3.3. Rentabilisation de l'Énergie Électrique et du Pompage d'Eau

L'optimisation énergétique constitue un levier stratégique pour sécuriser les marges d'exploitation. Dans l'industrie extractive, la consommation électrique dépasse la simple donnée comptable : elle représente un **diagnostic direct de la santé mécanique** des installations.

Pour quantifier cet impact, nous croisons la structure tarifaire définie à la section 4.1.2 avec l'équation de la puissance électrique triphasée validée lors de nos essais :

$$P = \sqrt{3} \times U \times I \times \cos(\varnothing)$$

Paramètres fixes:

- **Tension U** : 380 V
- **Facteur de puissance** ($\cos(\varnothing)$) : 0,8
- **Tarif industriel (Sonelgaz)** : 5,48 DA/kWh

4.3.4. Bilan énergétique de l'approche conventionnelle (Terrain)

À une vitesse agressive de **3,5 m/h**, le cycle de coupe est complété en **0,43 heure**. Ce régime contraint le moteur à opérer en surcharge sévère avec une intensité de **98 Ampères**.

- **Puissance absorbée P_c** :

$$\sqrt{3} \times 380 \times 98 \times 0.8 = 51.6 \text{ (kW)}$$

$$P=51.6 \text{ (kW)}$$

- **Énergie consommée E_c** :

$$E_c = P_c \times t_c = 51,60 \times 0,43 = 22,19 \text{ kWh}$$

- **Coût énergétique (C_{ec})** :

$$C_{ec} = E_c \times \text{Tarif}$$

$$C_{ec} = 22.19 \times 5.48 = 121.57 \text{ (DA)}$$

$$C_{ec} = 121.57 \text{ (DA) par bloc}$$

4.3.5. Bilan énergétique du modèle optimisé

À 2,67 m/h, le temps de coupe passe à 0,56 heure. L'intensité chute alors vers un régime sécurisé de 55 Ampères.

Puissance absorbée (P_{opt}) :

$$P = \sqrt{3} \times 380 \times 55 \times 0.8$$

$$P = 28.96 \text{ (kW)}$$

Énergie consommée (E_{opt}) :

$$E_{opt} = 28.96 \times 0.56$$

$$E_{opt} = 16.22 \text{ (kWh)}$$

Coût énergétique(C_{e-opt}) :

$$C_{e-opt} = 16.22 \times 5.48$$

$$C_{e-opt} = 88.87 \text{ (DA)/bloc}$$

4.4. Analyse des résultats et impacts industriels

La comparaison entre les deux modèles révèle des enseignements qui dépassent la simple lecture comptable. Bien que l'économie financière directe (32,70 DA par bloc) puisse paraître modeste à l'échelle d'une unité de production, elle est le reflet d'une **optimisation mécanique profonde**.

Tableau 4.6 : Comparaison de la performance énergétique par bloc

Paramètre Énergétique	Méthode Conventionnelle	Méthode Optimisée	Écart / Impact
Intensité du courant (I)	98 A	55 A	- 43,8 %
Puissance absorbée (P)	51,60 kW	28,96 kW	- 22,64 kW
Temps de coupe (t)	0,43 h	0,56 h	+ 0,13 h
Coût Énergétique (DA/bloc)	121,57 DA	88,87 DA	- 32,70 DA

Interprétation technique des gains :

1. **Réduction de la charge mécanique (-44 %) :** La baisse de l'intensité de 98 A à 55 A témoigne d'un moteur qui n'est plus en état de souffrance. Cette réduction de la charge mécanique est le garant de la longévité des organes de transmission.
2. **Maîtrise de l'impact thermique :** Le maintien du moteur dans sa « zone de confort » élimine les pics de température au sein des bobinages. En évitant les contraintes thermiques extrêmes, on réduit drastiquement le risque de claquage des isolants et les coûts de maintenance curative associés.
3. **Efficacité du pompage et refroidissement :** Une gestion stabilisée garantit que le flux d'eau de refroidissement est utilisé de manière optimale pendant toute la durée du sciage, sécurisant ainsi le trait de coupe sans gaspillage d'énergie.
4. **Pérennité des infrastructures :** Cette approche assure la fiabilité à long terme de l'ensemble de la chaîne de puissance (variateurs, câbles, moteur) de l'usine **ENAMARBRE**

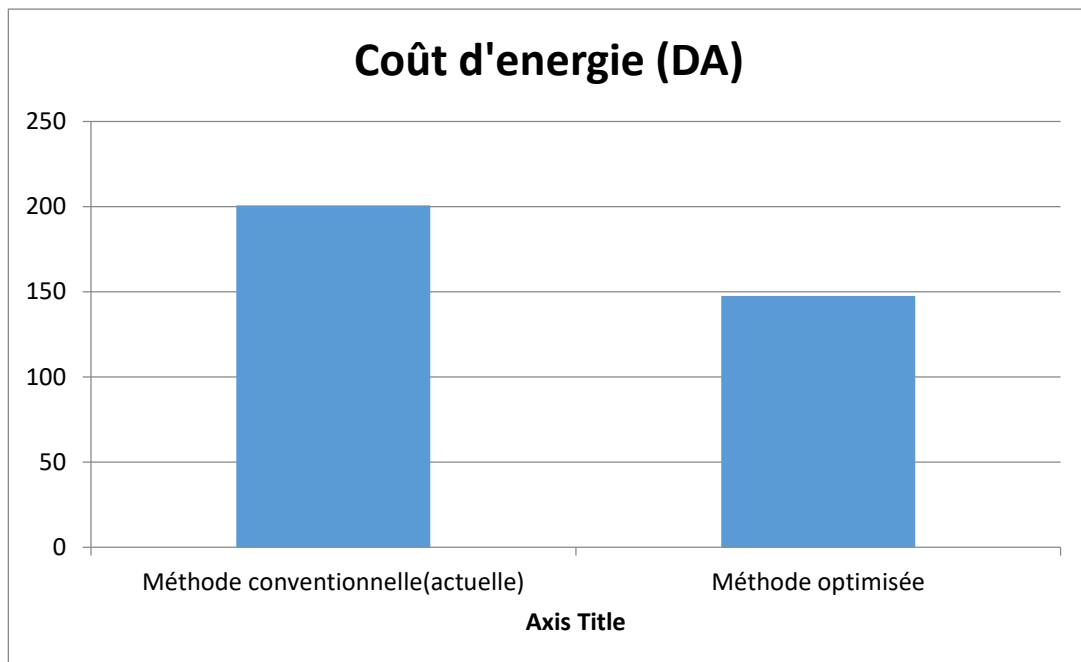


Figure 4.8 : Analyse comparative de l'efficacité énergétique par bloc (DA).

4.4.1. Optimisation du Coût de la Main-d'œuvre Directe

L'impact de notre modèle sur la rentabilité du personnel est évalué en appliquant la formule du coût de la main-d'œuvre définie précédemment :

$$C_m = (N \times T_h) \times t$$

Où :

C_m : Coût total de la main-d'œuvre référence (DA)

N : Nombre d'ouvriers affectés à la machine ($N=1$ généralement pour le Benetti)

T_h : Taux horaire (salaire par heure) de l'opérateur (DA/h) ; (194,44 DA/h).

t : Temps réel de l'opération de coupe (h)

➤ Calcul pour la méthode conventionnelle ($t = 0,43$ h):

$$C_m = 1 \times 194,44 \times 0,43$$

$$C_m = 83.61 \text{ (DA)}$$

➤ Calcul pour la méthode optimisée ($t = 0,56$ h):

$$C_m = 1 \times 194,44 \times 0,56$$

$$C_m = 108,89 \text{ (DA)}$$

Le tableau ci-dessous synthétise cet écart lié au temps de présence machine :

Tableau 4.7 : Analyse comparative du coût de la main-d'œuvre directe

Paramètre Main-d'œuvre	Méthode Conventionnelle	Méthode Optimisée	Écart
Nombre d'opérateurs (N)	1	1	-
Taux Horaire (Th)	194,44 DA/h	194,44 DA/h	-
Temps de présence (t)	0,43 h	0,56 h	+ 0,13 h
Coût Main-d'œuvre (Cm)	83,61 DA	108,89 DA	+ 25,28 DA

Bien que le coût direct par bloc augmente légèrement de **25,28 DA**, cette variation est largement compensée par les bénéfices organisationnels et sécuritaires :

- **Stabilité et Fiabilité** : Cette méthode représente un investissement dans la stabilité du site. En évitant les surcharges, on réduit les pannes imprévisibles, permettant de passer d'une "gestion de crise" (arrêts fréquents pour casse de fil) à une production fluide et maîtrisée.
- **Optimisation de la rotation (Shift de 12h)** : Sur une rotation standard (06h00–18h00), la régularité du sciage assure un volume de production prévisible. La machine travaille de manière autonome et stable, ce qui diminue la charge mentale et la fatigue physique de l'opérateur.
- **Valorisation du temps de travail** : Le temps supplémentaire passé par bloc n'est pas une perte d'efficacité, mais une garantie de pérennité opérationnelle. Il assure que l'outil de production de l'usine **ENAMARBRE** reste disponible et fonctionnel sur le long terme.

4.4.2. Analyse du Coût de l'Approvisionnement en Eau

Le système de refroidissement constitue un organe vital du processus de sciage au fil diamanté. L'eau est acheminée depuis le fleuve vers les bassins de stockage avant d'être injectée dans le trait de scie de la **Benetti Gamma 875**. Bien que la ressource brute soit naturelle, son exploitation génère un coût opérationnel induit par l'énergie de pompage.

Sur la base de la puissance nominale du groupe de pompage et du temps de coupe, nous avons estimé la consommation électrique dédiée à l'approvisionnement en eau.

Évaluation comparative du coût de pompage :

Le coût du pompage est directement proportionnel au temps de fonctionnement de la machine. Notre modèle d'optimisation, établi au **Chapitre 3** ($Q_{opt} = C \times (V_{opt} \times H_{opt})$), permet de réguler ce flux pour éviter le gaspillage tout en garantissant l'intégrité thermique du fil.

- **Coût méthode conventionnelle (t = 0,43 h) : 7,18 DA par bloc**
- **Coût méthode optimisée (t = 0,56 h) : 9,35 DA par bloc**

Interprétation : "L'eau comme assurance matériel"

Bien que le coût optimisé de **9,35 DA** soit légèrement supérieur, il demeure dérisoire face à la valeur d'acquisition du fil diamanté.

1. **Sécurité Thermique** : Une économie sur le débit d'eau ou sur le temps de refroidissement entraînerait une surchauffe immédiate des perles, provoquant leur vitrification ou leur déchaussement.
2. **Protection de l'Investissement** : En respectant le débit calculé par notre modèle, nous garantissons que l'outil de coupe travaille dans des conditions de frottement réduit.
3. **Arbitrage Économique** : Le surcoût de **2,17 DA** par bloc est une **véritable prime d'assurance** sur la longévité du matériel. Il est largement compensé par l'économie de **1 435 DA** réalisée sur l'usure du fil.

4.5. Synthèse de la Rentabilité Globale

Ce bilan financier final consolide l'ensemble des données techniques et opérationnelles analysées précédemment. L'objectif est de quantifier avec précision l'impact direct du modèle optimisé sur la structure de coûts du site de Filfila (ENAMARBRE).

Le tableau ci-dessous met en évidence le contraste majeur entre l'approche empirique conventionnelle et notre solution d'ingénierie :

Tableau 4.8 : Synthèse comparative des coûts de production directs par bloc (DA)

Poste de dépense	Méthode Conventionnelle	Méthode Optimisée	Écart (Gain)
Consommation du fil (C USURE)	1 820,00 DA	385,00 DA	- 1 435,00 DA
Énergie électrique (Ce)	121,57 DA	88,87 DA	- 32,70 DA
Main-d'œuvre directe (Cm)	83,61 DA	108,89 DA	+ 25,28 DA
Pompage de l'eau	7,18 DA	9,35 DA	+ 2,17 DA
COÛT TOTAL PAR BLOC	2 032,36 DA	592,11 DA	- 1 440,25 DA

Il paraît que le coût de production par bloc chute de **2 032,36 DA** à **592,11 DA**, soit une **réduction massive de 71 %** des dépenses opérationnelles directes. Ce résultat démontre que l'investissement en temps (coupe légèrement plus longue) est largement rentabilisé par l'économie remarquable sur le consommable.

4.5.1. Impact sur la Durée de Vie des Équipements

Au-delà des gains financiers immédiats, l'optimisation des paramètres de coupe constitue une protection vitale pour le capital technique de l'unité de production.

4.5.2. Comparaison de la Longévité du fil diamanté

L'indicateur de performance le plus probant est le nombre de blocs produits par unité de fil. En extrapolant nos taux d'usure, nous obtenons les projections suivantes :

Tableau 4.9 : Performance de production du fil diamanté (Boucle de 7 m)

Méthode de travail	Taux d'usure (%)	Nombre de blocs produits
Méthode Conventionnelle	10,4 %	9,6
Méthode Optimisée	2,2 %	45,4

Ce résultat indique une **multiplication de la durée de vie du fil par un facteur de 4,7**. Pour l'entreprise, cela signifie une réduction drastique de la fréquence d'achat des consommables et une diminution des temps d'arrêt machine liés aux changements de câbles.

4.5.3. Préservation du système électromécanique

Le passage d'une intensité de surcharge (**98 A**) à un régime nominal sécurisé (**55 A**) assure la pérennité de la machine **Benetti Gamma 875** sur trois niveaux :

1. **Protection Thermique** : Le moteur principal opère désormais dans sa plage de température optimale, évitant la dégradation prématurée des isolants du bobinage.
2. **Intégrité Électrique** : Les variateurs de vitesse et les composants de puissance sont protégés contre les pics d'intensité, réduisant le risque de pannes électroniques coûteuses.
3. **Stabilité Mécanique** : La stabilisation de la vitesse d'avance réduit les vibrations parasites (broutement), protégeant ainsi les rails de guidage, les poulies et l'ensemble de la structure cinématique.

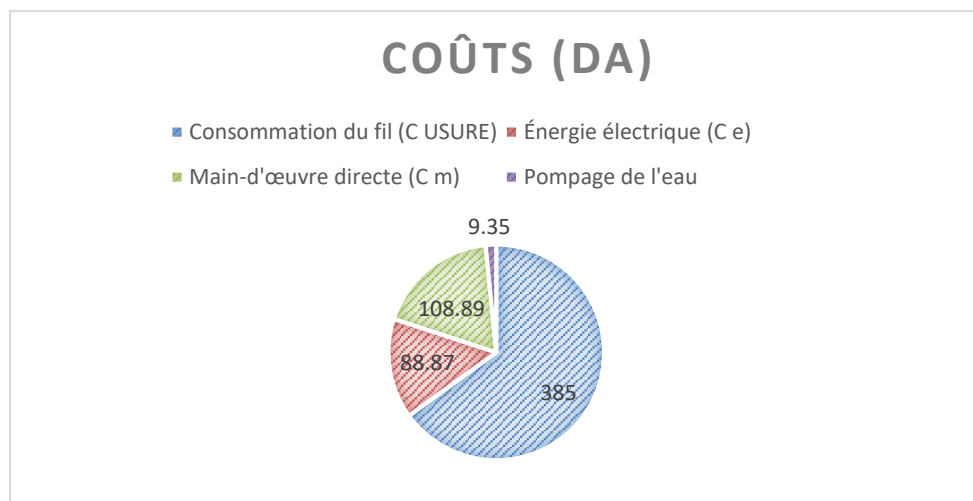


Figure 4.9 : Répartition des charges dans le modèle optimisé en DA

La Figure 4.9 est un graphique (circulaire par exemple) illustrant que le fil diamanté représente, dans la méthode ancienne, plus de 80 % du coût, alors qu'il est mieux réparti dans le modèle optimisé.

4.6 Projection Économique

En appliquant ce gain réel de 1440.25 DA par bloc à la production de l'usine nous obtenons les projections suivantes à l'échelle industrielle :

Tableau 4.10 : Projection des gains financiers liés à l'optimisation

Période de production	Volume estimé	Gain net estimé (DA)
Par jour	4 blocs	5761.00
Par mois (20 jours)	80 blocs	115220.00
Par an (12 mois)	960 blocs	1382640.00

4.6.1 Analyse des projections financières :

- Ces résultats montrent l'impact important du modèle d'optimisation à l'échelle industrielle. Avec un gain net de 1 440,25 DA par bloc de référence, l'entreprise

ENAMARBRE peut atteindre une économie annuelle estimée à plus de 1,3 million de dinars pour une seule machine.

- Ces économies sur les charges d'exploitation constituent une ressource financière importante, pouvant être réinvestie dans la maintenance préventive des équipements ou dans l'achat de nouveaux fils diamantés.
- Ainsi, le modèle proposé dépasse la simple amélioration technique et devient un véritable levier de performance économique pour le site de Filfila

Conclusion

L'étude économique réalisée dans ce chapitre confirme que la rentabilité du site de Filfila dépend directement de la rigueur des paramètres techniques de coupe. En remplaçant une gestion purement empirique par notre modèle mathématique optimisé nous avons atteint des résultats spectaculaires.

Le coût de production par bloc de référence est passé de 2032.36 DA à seulement 592.11 DA soit une réduction massive de 71 % des charges d'exploitation. Cette performance financière repose principalement sur la préservation du fil diamanté dont l'usure a été divisée par quatre. Au-delà des gains financiers immédiats cette approche sécurise le capital technique de l'entreprise ENAMARBRE en protégeant les moteurs et les infrastructures de pompage contre les surcharges thermiques.

En conclusion l'ingénierie appliquée au processus de sciage n'est pas une simple option technique mais une nécessité économique vitale. Elle transforme une exploitation traditionnelle en une unité de production moderne rentable et durable capable de maximiser la valeur de chaque mètre cube de marbre extrait.

CONCLUSION GÉNÉRALE

Conclusion générale

Ce travail de recherche s'inscrit directement dans une démarche de modernisation de l'industrie extractive des roches ornementales en Algérie, à travers l'étude approfondie du gisement de marbre de Filfila situé à Skikda. La problématique majeure de notre investigation consistait à substituer l'approche empirique et intuitive, traditionnellement adoptée par les opérateurs sur les machines de découpe au fil diamanté, par une méthodologie de pilotage rationnelle, scientifique et rigoureusement optimisée. L'enjeu fondamental résidait dans l'atteinte d'un compromis technique capable de maximiser le rendement horaire tout en maîtrisant les coûts énergétiques et l'usure mécanique de l'outil.

Pour concrétiser cet objectif, notre démarche s'est structurée autour de trois axes complémentaires. D'abord, une caractérisation systématique des propriétés géo mécaniques du marbre de Filfila a été menée pour cerner les contraintes intrinsèques liées à la découpe. Ensuite, une campagne d'essais sur site, basée sur la méthode OFAT, et enfin une analyse analytique reposant sur les lois fondamentales de l'électrotechnique, combinée à une évaluation technico-économique, nous a permis de quantifier l'impact réel des variations cinématiques.

Les analyses effectuées mettent en évidence une corrélation étroite entre la vitesse d'avance V_a

L'énergie spécifique (E_s) et le taux d'usure du fil (ad). Ces corrélations ont abouti à l'établissement de règles opératoires claires et de formules d'asservissement pratiques pour le chantier, notamment: Le taux de découpe ($Td = 4 \text{ m}^2/\text{h}$), Régulation de la vitesse d'avance (V_a), Équation d'asservissement du débit d'eau (Q_{opt}).

Sur le plan financier, l'introduction de ces paramètres optimisés engendre des retombées économiques majeures pour l'exploitant. Les calculs font ressortir un gain net de **1440,25 DA** par bloc de référence. À l'échelle d'une seule unité de découpe, l'économie annuelle projetée dépasse **1,3million de DA**, ce qui valide sans équivoque la rentabilité de notre approche. Ces ressources financières récupérées réduisent directement les charges d'exploitation et peuvent être réinjectées dans la maintenance préventive ou l'approvisionnement en fils diamantés de rechange.

En guise de conclusion, ce mémoire ne saurait constituer une finalité en soi, mais pose plutôt les jalons techniques de futures investigations minières. Parmi les perspectives envisagées,

Conclusion Générale

l'automatisation en temps réel de la vitesse d'avance en fonction des variations de dureté de la roche offre une voie prometteuse. De plus, l'extension de cette étude à l'analyse d'autres variables (angle d'attaque du fil, résistance des perles), ainsi que l'intégration de solutions énergétiques hybrides solaires pour les sites isolés, constitueraient des contributions majeures pour réduire l'empreinte environnementale et optimiser globalement l'exploitation des carrières

RÉFÉRENCES BIBLIOGRAPHIQUES

Références Bibliographiques

[1] OUAHAB A. I. ; ALOUANE F. Contribution à la caractérisation minéralogique du marbre de Fil-Fila (Skikda). Collection « Mémoires de Master en Mines et Géologie ». Université Abderrahmane Mira de Bejaia. Juillet (2021).

[2] VERMONT STATE LEGISLATURE. The Vermont Statutes Online: State Rocks (Marble, Granite and Slate). Collection « General Assembly of the State of Vermont ». Title 1, Chapter 11, Section 504. 1991

[3] BELGHOUL, A. Etude technico-économique de la méthode d'exploitation du marbre de Fil-Fila. [Mémoire de Projet de Fin d'Etudes pour l'obtention Du Diplôme d'Ingénieur d'Etat en Génie Minier]. Ecole Nationale Polytechnique, Alger (2014)

<https://repository.enp.edu.dz/jspui/bitstream/123456789/4779/1/BELGHOUL.Ahmed.pdf>

[4] BOUGRIRES, A., CHAOUCH, D. et GHARBI, H. Contribution à l'analyse des techniques d'exploitation du marbre. [Mémoire de Licence académique en Exploitation des mines]. Université Cheikh Larbi Tebessi-Tébessa (2023)

[5] AKBULUT, H. L'industrie de la pierre naturelle en Turquie : Production, consommation et exportations. Journal of Mining Science, vol. 46, n° 3, pp. 312-325. (2010)

[6] BESSAC J.-C. ; Lazzarini L. La notion historique de « marbres antiques » et les flux commerciaux en Méditerranée. Collection « Archéologie et Histoire de l'Art ». Tome 02. Décembre 2012.

[7] https://fr.wikipedia.org/wiki/Liste_de_marbres_antiques 2026/03/24

[8] BESSIÈRE, G. et ROMAN, D. Les marbres antiques : Caractérisation et origine. Revue d'Archéométrie, pp. 12-28. (2010)

Adapté d'après les rapports de l'USGS (Mineral Commodity Summaries 2024) et les données de Stone Sector Database (Estimations 2025).

[9] U.S. GEOLOGICAL SURVEY. Mineral Commodity Summaries 2024. U.S. Department of the Interior. Consulté le [2026\05\14], sur https://www.usgs.gov/STONE_SECTOR

Références Bibliographiques

DATABASE. (2025). Global Stone Industry: Market Estimates and Trends 2025. [Rapport technique (2024)]

[10] ANAM. Rapport d'activité annuel sur le secteur minier en Algérie. Agence Nationale des Activités Minières, Ministère de l'Énergie et des Mines (2023)

[11] ENAMARBRE. Rapport d'exploitation et de production des carrières de Fil-Fila (Skikda). Direction de la production, Entreprise Nationale du Marbre (2023)

[12] ORGM. Étude géologique et évaluation des réserves du gisement de marbre de Fil-Fila (Skikda). [Rapport technique]. Office National de Recherche Géologique et Minière, Boumerdès. (2011).

[13] dhikra et ikhlas, D. LES TECHNIQUES D'EXPLOITATION DES GISEMENTS DE MARBRE (CAS DE FILFILA – SIKKDA). Mémoire de Master en Génie minier (Option : Exploitation des mines). Université Echahid Cheikh Larbi Tébessi – Tébessa, Institut des Mines, Algérie (2023).

[14] Ministère de l'Énergie et des Mines Annuaire du secteur minier : Profil des entreprises publiques. Publications du secteur minier algérien **(2023)**.

[15] Données recueillies auprès du service technique de la carrière (2023-2024).

[16] ENAMARBRE. Procédures de Gestion Carrière à Blocs : Carrière à Blocs de Fil-Fila. Direction Générale, Direction de la Production, Algérie. (Document interne). (2013).

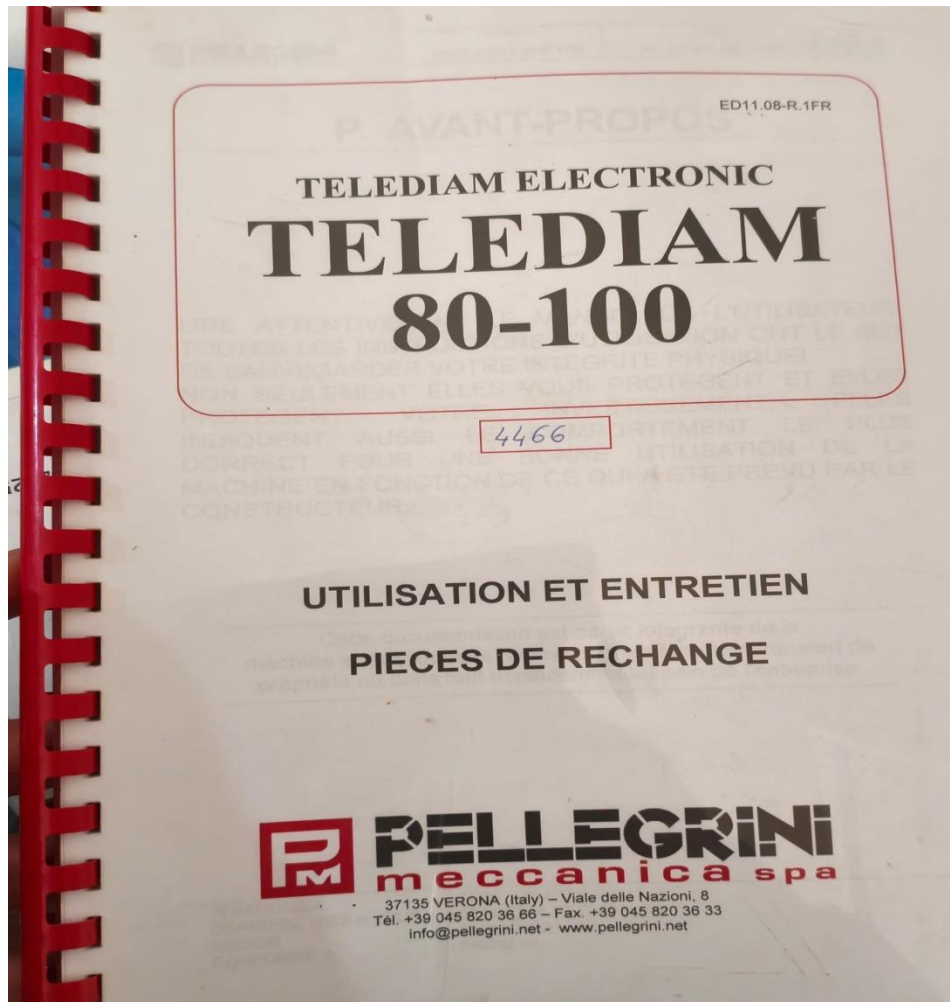
[17] CARDU, M. ET OREFICE, R. A further analysis of the cutting technologies in stone quarries. American journal of Mining and Metallurgy, pp. 1–7 (2012)

[18] Lanzetta et al. (2003), "Diamond Wire Cutting of Marble.Lanzetta, M., Tantussi, G., & Romoli, V. (2003). pp. 113-126. ISBN: 88890210121.

[19] BENETTI MACCHINE S.p.A. (s.d.). Manuel original d'installation et de maintenance, Gamma 875 Series. Carrara, Italie

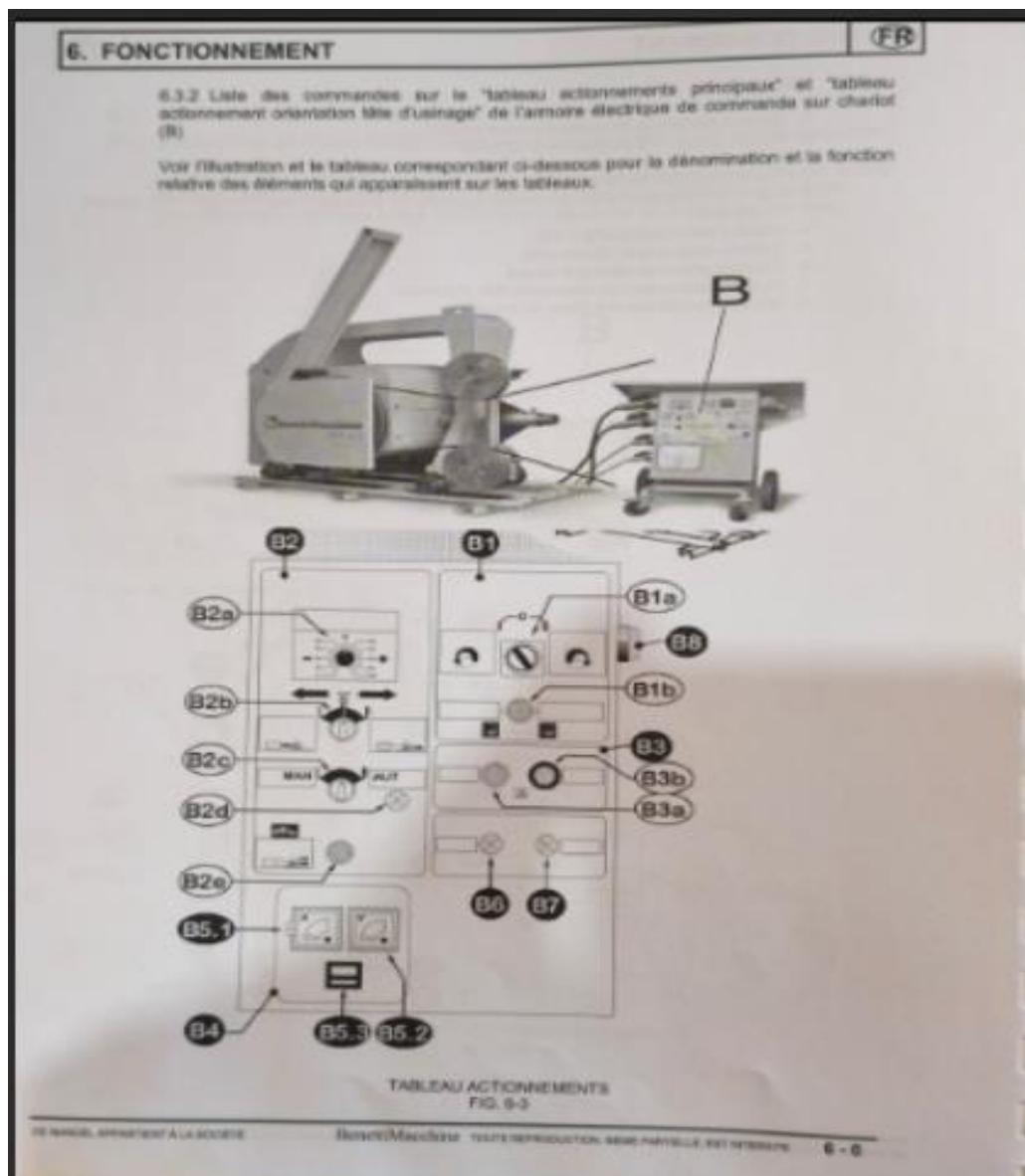
- [20] ENAMARBRE. Paramètres de coupe et caractéristiques mécaniques des types de marbre. Annexe technique dans : Procédures de Gestion Carrière à Blocs. Direction Générale, Algérie. (2013).
- [21] Montgomery, D. C. Design and Analysis of Experiments. 9th Edition, Chapter 1, Page 7. (2017).
- [22] BRONSHTEIN, I. N., SEMENDYAYEV, K. A., MUSIOL, G. et MÜHLIG, H ,*Handbook of Mathematics*. 5e édition, Springer-Verlag, Berlin.(2007)
- [23] Cardu, M., & Ciccu, R., Technologies de découpe des roches par fil diamanté, Revue de l'Industrie Minérale, Saint-Étienne, 2010.
- [24] Yilmazkaya, E., Investigation of diamond wire cutting performance in marble quarries, Journal of Mining Science, 2018.
- [25] Mancini, R., & Cardu, M., Le sciage des roches ornementales : Aspects énergétiques et techniques, Éditions de l'École des Mines, Paris, 2011.
- [26] J.W. Nilsson et S.A. Riedel, Electric Circuits, 10ème éd., Pearson, 2015
- [27] Michèle Kanès, L'essentiel des mathématiques : Géométrie Plane, Éditions Nathan, Paris, 2015, p. 42.
- [28] Konstanty, J.,. Diamond Tools in Stone Industry. 1st ed. Oxford: Elsevier Science, pp. 125-140 , 2002
- [29]J.W. Nilsson et S.A. Riedel, Electric Circuits, 10ème éd., Pearson, 2015
- [30] M.A. Raza, S. Raza, M.U. Khan, M.Z. Emad, K. Jalil, et S.A. Saki, « Cost modelling for dimension stone quarry operations », The Journal of the Southern African Institute of Mining and Metallurgy, vol. 123, n° 11, pp. 521, 2023. [En ligne]. Disponible : <https://scielo.org.za/pdf/jsaimm/v123n11/04.pdf>

Annexe 1 : Page de garde du manuel d'instruction de la machine BENETTI (Modèle GAMMA 875). (Source : *Manuel Benetti Macchine S.r.l.*)



Annexe 2 : Branchements électriques et vue générale de l'armoire électrique sur chariot.

(Source *Manuel Benetti Macchine S.r.l.*)



Annexe 3 : Fiche des données techniques de la machine à fil diamanté (55 kW). (Source : Manuel d'instruction Benetti Macchine, Modèle GAMMA 87)

ESTABLISHED 1926
Impianti escavazione
Macchine Pistoie e Ginevra
Macchine senza smi
Grandi Quercy Plants

DESCRIPTION DE LA MACHINE ET SPECIFICATIONS		
DONNEES TECHNIQUES DE LA MACHINE 55kW		
Moteur électrique tête d'usinage	KW	55
	V	380 ÷ 500
	Hz	50
Moteur électrique transl./tensionnement	KW	0,60
Moteur électrique orientation tête	KW	0,55
Diamètre poulie motrice	mm	780
Démarrage poulie motrice		étoile/triang. ou direct
Tensionnement fil diamanté		Automatique
Interaxe de coupe maximum	m	1.072
Niveau protection armoire électrique	IP	55
Poids maximum machine uniqu.	kg	1.520
Poids rail de 2000 mm seul	kg	56
Poids rail sans crémaillère de 1500 mm	kg	26
Poids armoire de commande sur chariot	kg	170

Annexe 4 : Fiche des données techniques de la machine à fil diamanté (45 kW).

(Source : Manuel d'instruction Benetti Macchine, Modèle GAMMA 87)

Genie Query Photo

DESCRIPTION DE LA MACHINE ET SPECIFICATIONS		
DONNEES TECHNIQUES DE LA MACHINE 45 kW		
Moteur électrique tête d'usinage	KW	45
	V	380 + 500
	Hz	50
Moteur électrique transl./tensionnement	KW	0,60
Moteur électrique orientation tête	KW	0,55
Diamètre poulie motrice	mm	780
Démarrage poulie motrice		étoile/triang. ou direct
Tensionnement fil diamanté		Automatique
Interaxe de coupe maximum	m	1.072
Niveau protection armoire électrique	IP	55
Poids maximum machine uniqu.	kg	1.450
Poids rail de 2000 mm seul	kg	56
Poids rail sans crémaillère de 1500 mm	kg	26
Poids armoire de commande sur chariot	kg	155

Annexe 5 : Data-driven

Le terme "**Data-driven**" (ou *pilotage par les données* en français) désigne une approche où les décisions, les stratégies et les actions d'une organisation sont basées sur l'analyse de données concrètes plutôt que sur l'intuition, l'expérience subjective ou des suppositions.

Dans le contexte de notre mémoire sur le sciage au fil diamanté, passer d'une méthode artisanale à une approche **Data-driven** signifie que l'opérateur ne règle plus la machine "au ressenti", mais en fonction des modèles mathématiques et des mesures (intensité, débit, vitesse) que vous avez établis.

Voici les piliers fondamentaux de cette approche :

1. La donnée comme preuve (Evidence-based)

Au lieu de dire "je pense que la machine force", l'approche Data-driven dit : "L'intensité est à **65 A**, ce qui dépasse le seuil critique de **61 A** défini par le modèle". La décision de ralentir est justifiée par un chiffre précis.

2. Le cycle de l'approche Data-driven

Pour qu'un système soit réellement piloté par les données, il suit généralement ce cycle :

- **Collecte** : Mesure des paramètres (vitesse, usure, débit).
- **Analyse** : Utilisation de vos formules (ex: $Q = 0,125 \times Td$).
- **Action** : Ajustement des commandes de la machine.
- **Optimisation** : Vérification du résultat et correction.

3. Les avantages industriels

L'adoption de cette philosophie dans une carrière comme celle de **Filfila** apporte plusieurs bénéfices majeurs :

- **Reproductibilité** : N'importe quel opérateur, même débutant, peut obtenir le même rendement en suivant l'abaque.
- **Prédictibilité** : On peut estimer précisément combien de temps prendra la coupe d'un bloc et quelle sera l'usure du fil.
- **Réduction des risques** : Les pannes et ruptures de fil diminuent car on ne travaille plus dans "l'aveugle".

Comparaison simplifiée

Aspect	Approche Traditionnelle (Intuitive)	Approche Data-driven (Scientifique)
<i>Source de décision</i>	Expérience personnelle de l'ouvrier.	Modèles et mesures en temps réel.
<i>Réglage du débit d'eau</i>	"À l'œil" (aspect visuel des boues).	Calculé via le coefficient spécifique (0,125).
<i>Gestion de la vitesse</i>	Maximale jusqu'à ce que le fil casse.	Optimale selon la hauteur ($Va = 4/H$).

Résultat

Performance variable et
aléatoire.

Rendement stable et usure
uniforme.