AKANIL · ATLAS MINING SARL

ATLAS GREEN COPPER

Document 04 — Processing Technology Options Study

الوثيقة 04 — دراسة خيارات تقنيات المعالجة

A qualitative comparison of the available processing routes for oxidized copper, leading to a staged technology pathway — conditional on test work, with no procurement recommended before results.

مقارنة نوعية لمسارات معالجة النحاس المؤكسد، تفضي إلى مسار تقني مرحلي — مشروط بالاختبارات، دون التوصية بالشراء قبل النتائج.

Project / المشروع	ATLAS Green Copper — Beni Mellal, Morocco
Company / الشركة	Atlas Mining SARL · structured by Mohamed Nabil / Akanil
Version	1.0 · June 2026
Language	Bilingual — English / العربية
Classification	Confidential — approved stakeholders only

This is an options study. All readiness, CAPEX and complexity comparisons are qualitative. No final technology selection or procurement is recommended before metallurgical test work (Document 03). Route selection depends on confirmed ore behaviour.

ENGLISH VERSION

1. Processing objectives

This study compares the processing routes available to ATLAS Green Copper and recommends a staged pathway. The objective is not to pick a final plant now, but to define which route the pilot should validate first and what later upgrades depend on. Route selection is conditional on the metallurgical results of Document 03; nothing here authorises procurement.

- Recover copper from oxidized ore at controlled, modular, low-impact pilot scale.
- Produce a tangible first product (cement copper) on modest capital.
- Keep a clear, conditional path to higher-value products and additional ore types.
- Integrate water recycling, renewable energy and digital monitoring from the pilot stage.

2. Ore type assumptions

The study assumes a dominantly oxidized (acid-soluble) copper ore, variable in grade, as indicated by preliminary evidence and to be confirmed by mineralogy and assays (Document 03, gate MG-1). A material sulfide component is not assumed; if it is confirmed, the route mix changes (see Option E). These assumptions are provisional and govern which options are live.

> **Conditional logic**
> Options A and C are the live oxide route, subject to leach and cementation results. Option D is a future upgrade. Option B is parallel R&D. Option E becomes relevant only if a sulfide component is confirmed. The ore decides; this study only frames the choice.

3. Option A — Controlled Modular Vat Leaching

Option A

Description	Batch leaching of sized oxidized ore in modular, acid-resistant vats with controlled solution chemistry.
Role in pathway	Primary pilot leaching route.
Technology readiness	High — leaching of oxide copper is commercially established; modular batch configuration is well understood.
CAPEX & complexity	Moderate; scalable in modules; materially below a full conventional plant.
Environmental profile	Controllable — closed-loop solution, containment, per-batch monitoring; depends on residue and acid management.

Condition to deploy	Confirmed as the pilot leach route subject to favourable leach results (MG-2 / MG-3).

4. Option B — Bioleaching / bio-assisted R&D

Option B

Description	Microbially assisted leaching investigated to enhance recovery for specific ore types.
Role in pathway	Innovation / R&D pathway only — outside the pilot critical path.
Technology readiness	Developmental for this context; requires dedicated bench R&D.
CAPEX & complexity	R&D-scale; complexity lies in biological control.
Environmental profile	Potentially lower reagent intensity; requires its own environmental validation.
Condition to deploy	Pursued as parallel bench R&D; never gates the pilot.

5. Option C — Cement Copper Production

Option C

Description	Recovery of copper from pregnant leach solution (PLS) by iron cementation to a cement copper product.
Role in pathway	First-stage product route, paired with Option A.
Technology readiness	High — cementation is a long-established recovery method.
CAPEX & complexity	Low to moderate; far below SX/EW.
Environmental profile	Manageable; iron consumption and residue handling tracked per batch.
Condition to deploy	Default first product subject to the cementation test (MG-4).

6. Option D — SX/EW future upgrade

Option D

Description	Solvent extraction – electrowinning (SX/EW) to produce copper cathode.
Role in pathway	Future upgrade beyond the pilot — not a starting point.
Technology readiness	High commercially, but capital- and operationally-intensive.
CAPEX & complexity	High; significant operating sophistication and energy demand.
Environmental profile	Higher energy and reagent footprint; requires full environmental work.
Condition to deploy	Considered only after pilot validation, at the expansion stage (EG gates, Doc 01).

7. Option E — Flotation (only if sulfide confirmed)

Option E

Description	Froth flotation to concentrate sulfide copper minerals.
Role in pathway	Contingency route, relevant only if a material sulfide component is confirmed.
Technology readiness	High commercially for sulfide ores.
CAPEX & complexity	High; water- and tailings-intensive.
Environmental profile	Higher water demand and tailings-management burden.
Condition to deploy	Considered only if mineralogy (MG-1) confirms significant sulfides; not part of the oxide pilot.

8. Water recycling integration

Across the leaching and cementation circuit, the pilot is designed for closed-loop water use where technically feasible, recycling process solution to reduce freshwater draw. The recycling rate and limits are defined by the water-chemistry test (Document 03, 6.1) and the Environmental & Water Management Concept (Document 05). Water recycling is a design requirement of the pilot, not an optional add-on.

9. Renewable energy integration

The pilot is designed with the potential to integrate renewable energy (for example solar) into its power supply where the site and engineering assessment allow, reducing the operational footprint. No generation capacity is specified here; it is subject to a site energy assessment and engineering design. The intent is a lower-carbon pilot, stated as a design aim rather than a commitment.

10. Digital monitoring layer

A digital monitoring layer runs across whichever route is selected, capturing batch, water, reagent, residue, energy, safety and product indicators. It provides the auditable evidence trail that underpins ESG reporting and feeds the Digital ESG data room (Document 06), and it enforces claims control by recording what is measured versus what is inferred.

11. Technology readiness comparison

Readiness is expressed qualitatively. No numeric TRL is asserted; these are indicative bands.

Option	Readiness (qualitative)	Note
A — Vat leaching	High	Commercially established for oxide copper
B — Bioleaching	Developmental (this context)	R&D pathway; not pilot-critical
C — Cement copper	High	Long-established recovery method
D — SX/EW	High but intensive	Mature, capital/operationally heavy

Option	Readiness (qualitative)	Note
E — Flotation	High (sulfides)	Only relevant if sulfide confirmed

12. CAPEX & complexity comparison (qualitative)

Option	CAPEX (qualitative)	Complexity (qualitative)
A — Vat leaching	Moderate, modular	Moderate
B — Bioleaching	R&D-scale	High (biological control)
C — Cement copper	Low–moderate	Low–moderate
D — SX/EW	High	High
E — Flotation	High	High (water/tailings)

No monetary figures are given; quantitative CAPEX requires engineering design and supplier quotations.

13. Environmental risk comparison

Option	Key environmental consideration	Risk (qualitative)
A — Vat leaching	Acid handling, residue, solution containment	Moderate, controllable
B — Bioleaching	Biological control; lower reagent intensity	To be validated
C — Cement copper	Iron consumption, residue handling	Low–moderate
D — SX/EW	Energy, reagents, solution management	Higher
E — Flotation	Water demand, tailings	Higher

14. Recommended staged pathway

The recommendation is a staged pathway, not a single technology pick. Each stage is conditional on the prior stage's evidence.

Stage	Technology	Trigger
Stage 1 — Pilot	Option A + Option C (vat leach → cement copper)	Favourable Doc 03 results (MG-2–MG-4)
Parallel — R&D	Option B (bioleaching, bench)	Runs alongside; never gates the pilot
Stage 2 — Expansion	Option D (SX/EW upgrade)	Only after pilot validation (EG gates)
Contingency	Option E (flotation)	Only if sulfide component confirmed (MG-1)

Procurement discipline

No equipment is selected or

Stage	Technology	Trigger
procured before the metallurgical test work confirms ore behaviour. The pathway above sets direction; the Doc 03 gates set permission.		

15. Pilot technology configuration

The recommended pilot configuration is the minimum modular set required to validate the Stage 1 route, designed to be expanded module-by-module rather than rebuilt.

Pilot module	Function
Selective mining & ore sorting	Separate mineralized material; feed control
Crushing & screening	Size the feed for leaching
Modular vat leaching (Option A)	Batch leach of sized oxidized ore
PLS handling	Collect and characterise pregnant leach solution
Iron cementation (Option C)	Recover copper as cement copper
Water recycling loop	Closed-loop solution reuse where feasible
Residue & acid management	Containment, neutralization, no uncontrolled discharge
Digital monitoring layer	Batch, water, reagent, residue, energy, safety, product

Assumptions

- Ore is dominantly oxidized and acid-leachable — to be confirmed (MG-1).
- All readiness, CAPEX and complexity statements are qualitative and indicative.
- SX/EW and flotation are not part of the pilot; they are upgrade and contingency routes.
- No procurement is implied or recommended ahead of test work.

Decision gates

Gate	Condition	Decision
TG-1	Ore type confirmed (MG-1)	Confirm oxide route (A+C) or trigger Option E review
TG-2	Favourable leach results (MG-2/MG-3)	Lock Option A as the pilot leach route
TG-3	Cementation validated (MG-4)	Lock Option C as the first product

Gate	Condition	Decision
TG-4	Pilot validated	Evaluate Option D (SX/EW) at expansion

Risk controls

Risk	Control
Selecting a route before evidence	Routes conditional on Doc 03 gates; no procurement pre-test
Over-scaling to SX/EW too early	SX/EW restricted to a post-pilot expansion upgrade
Missing a sulfide component	Option E held ready; triggered by MG-1 mineralogy
Greenwashed technology claims	Qualitative comparison; digital monitoring records actuals
Locked-in, non-modular build	Pilot designed for modular, incremental expansion

Closing note

This study fixes the direction — a modular vat-leach and cement-copper pilot, with SX/EW as a future upgrade, bioleaching as parallel R&D, and flotation as a sulfide contingency — while leaving the final selection to the evidence. Its outputs feed the Environmental & Water Management Concept (Document 05) and the Digital ESG data room (Document 06).

> **Ready to proceed to Document 05?**
> Document 05 — Environmental & Water Management Concept — builds the environmental logic for the selected pilot configuration and for green finance.

النسخة العربية

١. أهداف المعالجة

تقارن هذه الدراسة مسارات المعالجة المتاحة لـ ATLAS Green Copper وتوصي بمسار مرحلي. والهدف ليس اختيار مصنع نهائي الآن، بل تحديد المسار الذي يجب أن يتحقّق منه الـ Pilot أولاً وما تعتمد عليه الترقيات اللاحقة. واختيار المسار مشروط بنتائج الوثيقة 03؛ ولا شيء هنا يجيز الشراء.

- استرداد النحاس من الخام المؤكسد على نطاق Pilot محكوم معياري منخفض الأثر.
- إنتاج منتج أولي ملموس (Cement Copper) برأس مال متواضع.
- الحفاظ على مسار واضح ومشروط نحو منتجات أعلى قيمة وأنواع خام إضافية.
- دمج إعادة تدوير المياه والطاقة المتجددة والمراقبة الرقمية منذ مرحلة الـ Pilot.

٢. افتراضات نوع الخام

تفترض الدراسة خام نحاس مؤكسداً في غالبه (قابل للذوبان الحمضي)، متفاوت العيار، وفق أدلة أولية تُؤكّد بالدراسة المعدنية والتحاليل (البوابة MG-1). ولا يُفترض مكوّن كبريتيدي مؤثّر؛ وإن ثبت تغيّر مزيج المسار (انظر الخيار E). وهذه الافتراضات مؤقتة وتحكم أي الخيارات فعّال.

المنطق الشرطي

الخياران A و C هما مسار الأكسيد الفعّال، رهناً بنتائج الترشيح والترسيب. الخيار D ترقية مستقبلية. الخيار B بحث وتطوير موازٍ. الخيار E لا يصبح ذا صلة إلا إذا ثبت مكوّن كبريتيدي. الخام هو الذي يقرّر؛ والدراسة تؤطّر الخيار فقط.

٣. الخيار A — الترشيح المعياري المحكوم في الأحواض

الخيار A

الوصف	ترشيح دفعات خام مؤكسد بمقاس محدد في أحواض معيارية مقاومة للحمض بكيمياء محلول محكومة.
الدور في المسار	مسار الترشيح الأساسي للـ Pilot.
جاهزية التقنية	عالية — ترشيح النحاس المؤكسد راسخ تجارياً؛ والتكوين المعياري مفهوم جيداً.
النفقات الرأسمالية والتعقيد	متوسطة؛ قابلة للتوسع بالوحدات؛ أقل جوهرياً من مصنع تقليدي كامل.
الملف البيئي	قابل للتحكم — محلول مغلق الدورة، احتواء، مراقبة لكل دفعة؛ رهناً بإدارة المخلفات والحمض.
شرط النشر	مؤكّد كمسار ترشيح للـ Pilot رهناً بنتائج ترشيح مواتية (MG-2 / MG-3).

٤. الخيار B — الترشيح الحيوي / بحث وتطوير

الخيار B

الوصف	ترشيح مدعوم ميكروبياً يُدرَس لتعزيز الاسترداد لأنواع خام محددة.

الدور في المسار	مسار ابتكار / بحث وتطوير فقط — خارج المسار الحرج للـ Pilot.
جاهزية التقنية	تطويرية في هذا السياق؛ تتطلب بحثاً مخبرياً مخصّصاً.
النفقات الرأسمالية والتعقيد	بنطاق بحث وتطوير؛ التعقيد في التحكم الحيوي.
الملف البيئي	إمكانية كثافة كواشف أقل؛ تتطلب تحققاً بيئياً خاصاً بها.
شرط النشر	يُتابَع كبحث مخبري موازٍ؛ ولا يُقيّد الـ Pilot.

٥. الخيار C — إنتاج Cement Copper

الخيار C

الوصف	استرداد النحاس من المحلول المُحمّل (PLS) بالترسيب بالحديد إلى منتج Cement Copper.
الدور في المسار	مسار المنتج الأولي، مقروناً بالخيار A.
جاهزية التقنية	عالية — الترسيب طريقة استرداد راسخة منذ زمن.
النفقات الرأسمالية والتعقيد	منخفضة إلى متوسطة؛ أقل بكثير من SX/EW.
الملف البيئي	قابل للإدارة؛ تُتبّع كمية الحديد وإدارة المخلفات لكل دفعة.
شرط النشر	المنتج الأولي الافتراضي رهناً باختبار الترسيب (MG-4).

٦. الخيار D — ترقية SX/EW المستقبلية

الخيار D

الوصف	الاستخلاص بالمذيبات والاستخلاص الكهربائي (SX/EW) لإنتاج كاثود النحاس.
الدور في المسار	ترقية مستقبلية بعد الـ Pilot — وليست نقطة بداية.
جاهزية التقنية	عالية تجارياً لكنها كثيفة رأسمالياً وتشغيلياً.
النفقات الرأسمالية والتعقيد	عالية؛ تعقيد تشغيلي كبير وطلب طاقة مرتفع.
الملف البيئي	بصمة طاقة وكواشف أعلى؛ تتطلب عملاً بيئياً كاملاً.
شرط النشر	يُنظَر فيه فقط بعد التحقق من الـ Pilot، في مرحلة التوسع (بوابات EG).

٧. الخيار E — التعويم (فقط عند تأكيد الكبريتيد)

الخيار E

الوصف	تعويم رغوي لتركيز معادن النحاس الكبريتيدية.
الدور في المسار	مسار طوارئ، ذو صلة فقط إذا تأكد مكوّن كبريتيدي مؤثّر.
جاهزية التقنية	عالية تجارياً للخامات الكبريتيدية.
النفقات الرأسمالية والتعقيد	عالية؛ كثيفة مياه ونفايات معالجة.
الملف البيئي	طلب مياه أعلى وعبء إدارة نفايات أكبر.

شرط النشر	يُنظَر فيه فقط إذا أكدت الدراسة المعدنية (MG-1) كبريتيداً مهماً؛ ليس جزءاً من Pilot الأكسيد.

٨. دمج إعادة تدوير المياه

عبر دائرة الترشيح والترسيب، يُصمّم الـ Pilot لاستخدام مغلق الدورة للمياه حيث يمكن تقنياً، بإعادة تدوير محلول المعالجة لخفض سحب المياه العذبة. وتُحدّد نسبة التدوير وحدودها باختبار كيمياء المياه (الوثيقة 03، 6.1) ومفهوم البيئة والمياه (الوثيقة 05). وإعادة تدوير المياه متطلب تصميمي للـ Pilot وليس إضافة اختيارية.

٩. دمج الطاقة المتجددة

يُصمّم الـ Pilot بإمكانية دمج الطاقة المتجددة (مثل الشمسية) في إمداده حيث يسمح الموقع والتقييم الهندسي، لخفض البصمة التشغيلية. ولا تُحدّد سعة توليد هنا؛ فهي خاضعة لتقييم طاقة الموقع والتصميم الهندسي. والقصد Pilot أقل كربوناً، كهدف تصميمي لا كالتزام.

١٠. طبقة المراقبة الرقمية

تعمل طبقة مراقبة رقمية عبر أي مسار يُختار، تلتقط مؤشرات الدفعة والمياه والكواشف والمخلفات والطاقة والسلامة والمنتج. وتوفر أثر أدلة قابلاً للتدقيق يدعم تقارير الـ ESG ويُغذّي غرفة بيانات الـ ESG (الوثيقة 06)، وتفرض ضبط الادعاءات بتسجيل ما يُقاس مقابل ما يُستنتج.

١١. مقارنة جاهزية التقنية

تُعبّر الجاهزية نوعياً؛ لا يُؤكّد رقم TRL؛ وهذه نطاقات إرشادية.

الخيار	الجاهزية (نوعي)	ملاحظة
A — ترشيح الأحواض	عالية	راسخ تجارياً للنحاس المؤكسد
B — الترشيح الحيوي	تطويرية	بحث وتطوير؛ غير حرج للـ Pilot
C — Cement Copper	عالية	طريقة استرداد راسخة
D — SX/EW	عالية لكن كثيفة	ناضجة، ثقيلة رأسمالياً/تشغيلياً
E — التعويم	عالية (كبريتيد)	ذو صلة فقط عند تأكيد الكبريتيد

١٢. مقارنة النفقات والتعقيد (نوعي)

الخيار	النفقات (نوعي)	التعقيد (نوعي)
A — ترشيح الأحواض	متوسطة، معيارية	متوسط
B — الترشيح الحيوي	بنطاق بحث	عالٍ (تحكم حيوي)
C — Cement Copper	منخفضة-متوسطة	منخفض-متوسط
D — SX/EW	عالية	عالٍ
E — التعويم	عالية	عالٍ (مياه/نفايات)

لا تُذكر أرقام مالية؛ النفقات الكمية تتطلب تصميماً هندسياً وعروض موردين.

١٣. مقارنة الخطر البيئي

الخيار	الاعتبار البيئي الرئيس	الخطر (نوعي)
A — ترشيح الأحواض	مناولة الحمض، المخلفات، احتواء المحلول	متوسط، قابل للتحكم
B — الترشيح الحيوي	التحكم الحيوي؛ كثافة كواشف أقل	يُتحقّق منه
C — Cement Copper	استهلاك الحديد، إدارة المخلفات	منخفض–متوسط
D — SX/EW	الطاقة، الكواشف، إدارة المحلول	أعلى
E — التعويم	طلب المياه، النفايات	أعلى

١٤. المسار المرحلي الموصى به

التوصية مسار مرحلي، وليست اختيار تقنية واحدة. وكل مرحلة مشروطة بدليل المرحلة السابقة.

المرحلة	التقنية	المحفّز
المرحلة 1 — Pilot	الخيار A + الخيار C (ترشيح أحواض ← Cement Copper)	نتائج الوثيقة 03 مواتية (MG-2–MG-4)
موازٍ — بحث	الخيار B (ترشيح حيوي، مخبري)	يسير بالتوازي؛ لا يُقيّد الـ Pilot
المرحلة 2 — توسع	الخيار D (ترقية SX/EW)	فقط بعد التحقق من الـ Pilot (بوابات EG)
طوارئ	الخيار E (التعويم)	فقط إذا تأكد المكوّن الكبريتيدي (MG-1)

انضباط الشراء

لا يُختار أي تجهيز أو يُشترى قبل أن تؤكد الاختبارات الميتالورجية سلوك الخام. المسار أعلاه يحدد الاتجاه؛ وبوابات الوثيقة 03 تمنح الإذن.

١٥. تكوين تقنية الـ Pilot

التكوين الموصى به للـ Pilot هو الحد الأدنى المعياري اللازم للتحقق من مسار المرحلة 1، مُصمّم للتوسع وحدة بوحدة لا لإعادة بنائه.

وحدة الـ Pilot	الوظيفة
التعدين الانتقائي وفرز الخام	فصل المادة المتمعدنة؛ التحكم بالتغذية
الجرش والغربلة	تحديد مقاس التغذية للترشيح
الترشيح المعياري (الخيار A)	ترشيح دفعات الخام المؤكسد
معالجة PLS	جمع وتوصيف المحلول المُحمّل
الترسيب بالحديد (الخيار C)	استرداد النحاس كـ Cement Copper

وحدة الـ Pilot	الوظيفة
حلقة إعادة تدوير المياه	إعادة استخدام المحلول مغلق الدورة حيث أمكن
إدارة المخلفات والحمض	احتواء، تعادل، لا تصريف غير محكوم
طبقة المراقبة الرقمية	الدفعة، المياه، الكواشف، المخلفات، الطاقة، السلامة، المنتج

الافتراضات

- الخام مؤكسد في غالبه وقابل للترشيح الحمضي — يُؤكّد (MG-1).
- جميع بيانات الجاهزية والنفقات والتعقيد نوعية وإرشادية.
- SX/EW والتعويم ليسا جزءاً من الـ Pilot؛ هما مسارا ترقية وطوارئ.
- لا يُفهم أو يُوصى بأي شراء قبل الاختبارات.

بوابات القرار

البوابة	الشرط	القرار
TG-1	تأكيد نوع الخام (MG-1)	تأكيد مسار الأكسيد (A+C) أو تفعيل مراجعة الخيار E
TG-2	نتائج ترشيح مواتية (MG-2/MG-3)	تثبيت الخيار A كمسار ترشيح للـ Pilot
TG-3	التحقق من الترسيب (MG-4)	تثبيت الخيار C كمنتج أولي
TG-4	التحقق من الـ Pilot	تقييم الخيار (SX/EW D) عند التوسع

ضوابط المخاطر

الخطر	الضابط
اختيار مسار قبل الدليل	مسارات مشروطة ببوابات الوثيقة 03؛ لا شراء قبل الاختبار
التوسع إلى SX/EW مبكراً	SX/EW مقيّد بترقية ما بعد الـ Pilot
إغفال مكوّن كبريتيدي	الخيار E جاهز؛ يُفعّل بدراسة MG-1
ادعاءات تقنية مُبالغة	مقارنة نوعية؛ المراقبة الرقمية تسجل الواقع
بناء غير معياري مقيّد	تصميم Pilot للتوسع المعياري التدريجي

ملاحظة ختامية

تُثبّت هذه الدراسة الاتجاه — Pilot ترشيح معياري و Cement Copper، مع SX/EW كترقية مستقبلية، والترشيح الحيوي كبحث موازٍ، والتعويم كطوارئ للكبريتيد — مع ترك الاختيار النهائي للدليل. وتُغذّي مخرجاتها مفهوم البيئة والمياه (05) وغرفة بيانات الـ 06 (ESG).

هل أنت مستعدّ للانتقال إلى الوثيقة 05؟
الوثيقة 05 — مفهوم البيئة وإدارة المياه — تبني المنطق البيئي لتكوين الـ Pilot المختار وللتمويل الأخضر.

VERSION FRANÇAISE

1. Objectifs de traitement

Cette étude compare les voies de traitement disponibles pour ATLAS Green Copper et recommande un parcours par étapes. L'objectif n'est pas de choisir une usine finale maintenant, mais de définir quelle voie le pilote doit valider en premier et de quoi dépendent les mises à niveau ultérieures. La sélection de la voie est conditionnée aux résultats métallurgiques du Document 03 ; rien ici n'autorise l'approvisionnement.

- Récupérer le cuivre à partir du minerai oxydé à une échelle pilote contrôlée, modulaire et à faible impact.
- Produire un premier produit tangible (ciment de cuivre) avec un capital modeste.
- Maintenir une voie claire et conditionnelle vers des produits à plus forte valeur ajoutée et des types de minerai supplémentaires.
- Intégrer le recyclage de l'eau, l'énergie renouvelable et la surveillance numérique dès le stade pilote.

2. Hypothèses sur le type de minerai

L'étude suppose un minerai de cuivre principalement oxydé (soluble dans l'acide), de teneur variable, comme indiqué par des preuves préliminaires et à confirmer par la minéralogie et les analyses (Document 03, porte MG-1). Une composante sulfurée importante n'est pas supposée ; si elle est confirmée, le mélange de voies change (voir Option E). Ces hypothèses sont provisoires et régissent les options actives.

3. Option A — Lixiviation en cuve modulaire contrôlée

- Description : Lixiviation par lots de minerai oxydé calibré dans des cuves modulaires résistantes aux acides avec une chimie de solution contrôlée.
- Rôle dans le parcours : Voie de lixiviation pilote primaire.
- Maturité technologique : Élevée — la lixiviation du cuivre oxydé est établie commercialement ; la configuration par lots modulaire est bien comprise.
- CAPEX et complexité : Modérés ; évolutifs en modules ; nettement inférieurs à une usine conventionnelle complète.
- Profil environnemental : Contrôlable — solution en circuit fermé, confinement, surveillance par lot ; dépend de la gestion des résidus et de l'acide.
- Condition de déploiement : Confirmé comme voie de lixiviation pilote sous réserve de résultats de lixiviation favorables (MG-2 / MG-3).

4. Option B — Biolixiviation / R&D bio-assistée

- Description : Lixiviation assistée par des microbes, étudiée pour améliorer la récupération pour des types de minerai spécifiques.

- Rôle dans le parcours : Voie d'innovation / R&D uniquement — en dehors du chemin critique du pilote.
- Maturité technologique : Développementale dans ce contexte ; nécessite une R&D de banc dédiée.
- CAPEX et complexité : Échelle R&D ; la complexité réside dans le contrôle biologique.
- Profil environnemental : Potentiellement plus faible intensité de réactifs ; nécessite sa propre validation environnementale.
- Condition de déploiement : Poursuivie comme R&D de banc parallèle ; ne bloque jamais le pilote.

5. Option C — Production de ciment de cuivre

- Description : Récupération du cuivre à partir de la solution de lixiviation enceinte (PLS) par cémentation au fer pour obtenir un produit de ciment de cuivre.
- Rôle dans le parcours : Voie de produit de première étape, associée à l'Option A.
- Maturité technologique : Élevée — la cémentation est une méthode de récupération établie de longue date.
- CAPEX et complexité : Faibles à modérés ; bien inférieurs au SX/EW.
- Profil environnemental : Gérable ; consommation de fer et gestion des résidus suivies par lot.
- Condition de déploiement : Produit initial par défaut sous réserve du test de cémentation (MG-4).

6. Option D — Future mise à niveau SX/EW

- Description : Extraction par solvant – électro-extraction (SX/EW) pour produire des cathodes de cuivre.
- Rôle dans le parcours : Future mise à niveau au-delà du pilote — pas un point de départ.
- Maturité technologique : Élevée commercialement, mais intensive en capital et en exploitation.
- CAPEX et complexité : Élevés ; sophistication opérationnelle et demande énergétique importantes.
- Profil environnemental : Empreinte énergétique et de réactifs plus élevée ; nécessite un travail environnemental complet.
- Condition de déploiement : Envisagé uniquement après validation pilote, au stade de l'expansion (portes EG, Doc 01).

7. Option E — Flottation (seulement si le sulfure est confirmé)

- Description : Flottation par mousse pour concentrer les minéraux de cuivre sulfurés.
- Rôle dans le parcours : Voie de contingence, pertinente uniquement si une composante sulfurée importante est confirmée.
- Maturité technologique : Élevée commercialement pour les minerais sulfurés.
- CAPEX et complexité : Élevés ; intensifs en eau et en résidus.

- Profil environnemental : Demande en eau et charge de gestion des résidus plus élevées.
- Condition de déploiement : Envisagé uniquement si la minéralogie (MG-1) confirme des sulfures importants ; ne fait pas partie du pilote d'oxyde.

8. Intégration du recyclage de l'eau

Tout au long du circuit de lixiviation et de cémentation, le pilote est conçu pour une utilisation de l'eau en circuit fermé là où c'est techniquement réalisable, recyclant la solution de traitement pour réduire le prélèvement d'eau douce. Le taux de recyclage et les limites sont définis par le test de chimie de l'eau (Document 03, 6.1) et le Concept de Gestion Environnementale et de l'Eau (Document 05). Le recyclage de l'eau est une exigence de conception du pilote, et non un ajout optionnel.

9. Intégration des énergies renouvelables

Le pilote est conçu avec le potentiel d'intégrer des énergies renouvelables (par exemple, solaire) dans son alimentation électrique là où le site et l'évaluation technique le permettent, réduisant ainsi l'empreinte opérationnelle. Aucune capacité de production n'est spécifiée ici ; elle est soumise à une évaluation énergétique du site et à une conception technique. L'intention est un pilote à plus faible émission de carbone, déclaré comme un objectif de conception plutôt qu'un engagement.

10. Couche de surveillance numérique

Une couche de surveillance numérique s'exécute sur la voie sélectionnée, capturant les indicateurs de lot, d'eau, de réactifs, de résidus, d'énergie, de sécurité et de produit. Elle fournit la piste d'audit qui sous-tend les rapports ESG et alimente la salle de données numériques ESG (Document 06), et elle applique le contrôle des revendications en enregistrant ce qui est mesuré par rapport à ce qui est déduit.

11. Comparaison de la maturité technologique

- Option A — Lixiviation en cuve : Élevée (Établie commercialement)
- Option B — Biolixiviation : Développementale (Voie R&D)
- Option C — Ciment de cuivre : Élevée (Méthode établie)
- Option D — SX/EW : Élevée mais intensive
- Option E — Flottation : Élevée (si sulfures confirmés)

12. Comparaison CAPEX et complexité

- Option A : Modéré, modulaire / Modérée
- Option B : Échelle R&D / Élevée
- Option C : Faible–modérée / Faible–modérée
- Option D : Élevée / Élevée
- Option E : Élevée / Élevée (eau/résidus)

13. Comparaison des risques environnementaux

- Option A : Manipulation acide, résidus, confinement / Modéré, contrôlable
- Option B : Contrôle biologique / À valider
- Option C : Consommation de fer, résidus / Faible–modéré
- Option D : Énergie, réactifs / Plus élevé
- Option E : Demande en eau, résidus / Plus élevé

14. Parcours par étapes recommandé

- Stade 1 — Pilote : Option A + Option C (lixiviation en cuve → ciment de cuivre) / Résultats Doc 03 favorables
- Parallèle — R&D : Option B (biolixiviation, banc) / Parallèle, ne bloque pas le pilote
- Stade 2 — Expansion : Option D (mise à niveau SX/EW) / Après validation pilote
- Contingence : Option E (flottation) / Si sulfure confirmé

15. Configuration technologique du pilote

La configuration recommandée est le jeu modulaire minimal pour valider le Stade 1.

- Tri sélectif et calibrage : Séparer le matériau minéralisé, contrôler l'alimentation
- Concassage et criblage : Calibrer l'alimentation
- Lixiviation en cuve modulaire : Lixiviation par lots
- Traitement PLS : Caractériser la solution
- Cémentation au fer : Récupérer le ciment de cuivre
- Boucle de recyclage : Réutilisation en circuit fermé
- Gestion des résidus : Confinement, neutralisation
- Surveillance numérique : Suivi complet

Assumptions

- Minerai oxydé et lixiviable à l'acide.
- CAPEX et complexité qualitatifs.
- SX/EW et flottation sont des options de mise à niveau/contingence.
- Aucun approvisionnement avant tests.

Portes de décision

- TG-1 : Ore confirmée (MG-1) -> Confirmer voie oxyde ou option E
- TG-2 : Lixiviation favorable (MG-2/MG-3) -> Verrouiller Option A
- TG-3 : Cémentation validée (MG-4) -> Verrouiller Option C
- TG-4 : Pilote validé -> Évaluer Option D (SX/EW)

Contrôles des risques

- Sélection avant preuves : Routes conditionnelles
- Surdimensionnement précoce : SX/EW limité à l'expansion
- Sulfure manquant : Option E prête
- Revendications greenwash : Surveillance numérique

- Construction rigide : Design modulaire

Note finale

Cette étude fixe la direction — un pilote de lixiviation en cuve et cimentation, avec SX/EW comme future mise à niveau. Ses résultats alimentent le Concept de Gestion Environnementale et de l'Eau (Document 05) et la salle de données numériques ESG (Document 06).