

# Terre de Résilience

*Projet de tours passives productrices d'eau en tout lieu (ou presque)*

La Terre n'a jamais cessé de changer. Depuis des milliards d'années, elle alterne entre ères glaciaires et longues périodes inter-glaciaires, avec ses pics de chaleur millénaires, ses océans qui montent, ses glaciers qui fondent, ses zones arides qui avancent et reculent au rythme des cycles. Ce n'est pas une anomalie. C'est la terre qui respire. L'activité humaine des deux derniers siècles a pu légèrement accélérer ce cycle, elle n'en est pas la cause première. Le réchauffement actuel suit sa logique propre, inscrite dans la géologie de la Terre, avec ou sans nous.

Les grandes civilisations qui ont prospéré dans les zones arides s'y sont adaptées. En Perse, En Égypte, dans l'Inde ancienne, les empires andins, le monde arabe, toutes ces régions n'ont pas combattu l'aridité. Elles l'ont gérée. Avec de la pierre, de la massivité, de la simplicité. Les badgirs — tours à vent persanes et iraniennes — refroidissaient l'air et condensaient l'humidité sans aucune énergie. Les qanat acheminaient l'eau sur des centaines de kilomètres par gravité seule. Les stepwells hindous, les citernes égyptiennes taillées dans le roc, les greniers-citernes andins : tous sans joint, sans liant, sans mécanique. Tous debout plusieurs millénaires après leur construction, là où tout le reste avait disparu. Ce qu'ils avaient compris : la durabilité vient de la massivité. Simple, efficace, ingénieux. Juste de la pierre, de l'air et de l'eau.

Pourtant, les réponses actuelles au changement climatique restent des rustines. Des accords qui ne tiennent pas et ne peuvent pas tenir, des technologies de captage carbone hors de prix, des objectifs de réduction qui arrivent trop tard pour inverser une courbe déjà engagée. On tente d'éviter l'inévitable, au lieu de s'y préparer dans l'accompagnement. Pendant ce temps, des millions de personnes manquent d'eau d'années en années. Des villages se vident chaque été un peu plus. Des régions entières glissent progressivement vers la désertification — non par surprise, mais selon un calendrier que la géologie connaît depuis toujours, que nous connaissons, sans agir réellement.

La vraie question n'est pas « comment éviter le changement ? » mais « comment accompagner et permettre au vivant de le traverser ? » C'est le principe de résilience — le même qui a permis à la vie de survivre aux catastrophes répétitives, aux basculements climatiques, aux millénaires de sécheresse passés et à venir. Non pas en résistant, mais en s'adaptant. Créer les conditions pour que la vie continue, s'installe, revienne là où elle avait abandonné le terrain au sable.

Terre de Résilience naît de cette évidence. Construire dans un matériau inaltérable et naturel — le granite (ou plutôt le PolyGranite, granite reconstitué) — qui sera utilisé sans aucune technologie accompagnant le fonctionnement, sans joint ni liant — c'est revenir à ce qui a toujours duré. La structure est massive, monolithique, antisismique : seuls l'air et l'eau y circulent. Pas de pompe, pas d'électricité, pas de pièce mobile. Ce parti pris supprime toutes les technologies de fonctionnement, sans exception. Il n'y a que le granite. Et c'est précisément ce qui rend la tour économique, pérenne, et déployable partout sur Terre — des plateaux andins au Sahel, des steppes d'Asie centrale aux côtes asséchées du Moyen-Orient.

Concrètement : une tour hydrique plantée dans une zone aride commence par fournir de l'eau à un village qui s'assèche en été — réponse immédiate. En dix ans, elle irrigue un périmètre végétal qui abaisse la température locale. En trente ans, c'est une zone revitalisée — une oasis en plein désert, un bosquet irrigué en région tempérée, un corridor vert en zone semi-aride. En cinq cents ans, une forêt. En dix mille ans, un biome complet — un écosystème qui est reconstruit là où il n'y avait plus rien, que de la poussière, pour les millénaires à venir.

Que ce soit dans les villages du sud de la France qui s'assèchent chaque été un peu plus, dans les régions méditerranéennes où les sources se taisent, au Moyen-Orient, en Afrique, en Amérique — partout où l'eau vient à manquer, ou est absente depuis trop longtemps, une tour, ou plusieurs en réseau, devient une réponse concrète, pérenne, sans dépendance à personne. Ce n'est pas juste une promesse ou juste un projet pilote. C'est une structure en granite qui commence à travailler le jour où elle est posée et qui n'arrête jamais. Cela pour que la vie reprenne là où presque plus rien n'existe, pour éviter qu'elle ne disparaisse pas là où elle est aujourd'hui en danger.

Ce projet ne déresponsabilise personne. L'eau produite par les tours est un point de départ — une ressource locale à gérer avec soin, à distribuer équitablement, à traiter si nécessaire. La résilience commence par les gestes, pas seulement par les structures. Les tours créent les conditions ; les communautés font le reste.

*« La décision du futur ne tient qu'à ceux qui veulent laisser derrière eux un monde où il sera possible de vivre. Accepter que le climat change, et comprendre qu'on est capable d'accompagner ce changement — non pas en pliant la nature à nos exigences, mais en l'accompagnant dans sa transformation, pour la survie du vivant. Pas juste celle de l'humanité. »*

*E. Lespert*

# Terre de Résilience

Document en deux parties: PARTIE I Porteurs de projet + PARTIE II Technique appliquée (ingénieurs et scientifiques).

Ce dossier principal est unifié en deux parties complémentaires: PARTIE I Porteurs de projet, puis PARTIE II Technique appliquée dédiée aux ingénieurs et scientifiques.

La première partie sert l'arbitrage public et opérationnel: faisabilité, options, coûts, risques et trajectoires de déploiement.

La seconde partie expose la chaîne scientifique complète: hypothèses, équations, protocoles de mesure, limites et critères de validation terrain.



*Note: dessin à titre indicatif descriptif.*

# PARTIE I - PORTEURS DE PROJET

## 0. Cadre porteur de projet - cinq axes de lecture

Ce dossier est une lecture porteur de projet complete du projet, pas un simple resume de communication.

Chaque axe est documente avec valeurs, limites, risques et conditions de pilotage.

- Technique: fonctionnement reel, architecture, capacites, limites.
- Financier: CAPEX/OPEX, marge, point mort, sensibilites.
- Economique: viabilite territoriale et mutualisation operationnelle.
- Politique: gouvernance, transparence, sequence de decision.
- Protection de la vie: securite des equipes et securisation des usages essentiels en eau.

## 0 bis. Lecture rapide porteur de projet - faisabilite et options

Cette section est une synthese de lecture immediate pour arbitrage: quelle option deployer, quel niveau de production viser, et a quel cout indicatif.

Les valeurs sont des ordres de grandeur de cadrage avant pilote local instrumente.

Les options regionales portent sur les puits (internes ou artesiens) selon contexte hydroclimatique et budget utilisateur.

- Objectif de lecture: decision en moins de 10 minutes sur scenario prudent, scenario central et scenario ambitieux.
- Trois questions: combien d'eau utile, quel cout de production, quel delai de mise en service.

**Tableau 1 - Options techniques de tour (lecture porteur de projet)**

| Option | Configuration                            | Effet attendu                      | Complexite | Usage cible                        |
|--------|------------------------------------------|------------------------------------|------------|------------------------------------|
| A      | Tour standard (anneau structurel inclus) | production de base                 | faible     | domestique simple                  |
| B      | Tour + puits internes                    | hausse humidite effective          | moyenne    | village/ville selon budget         |
| C      | Tour + puits artisien                    | humidite + fraicheur robustes      | elevee     | desert/montagne/usage critique     |
| D      | Tour + puits internes + artisien         | performance maximale en climat sec | elevee     | sites prioritaires budget renforcé |

## 0 ter. Projections de resultats - court, moyen et long terme

Le pilotage porteur de projet repose sur des horizons: court terme pour valider le pilote, moyen terme pour rentabiliser, long terme pour la vision territoriale.

- Court terme: preuve de performance et stabilite operationnelle.
- Moyen terme: baisse de cout et extension progressive.
- Long terme: infrastructure territoriale d'eau et filiere locale.

**Tableau 2 - Horizon de decision**

| Horizon    | Livrable principal | Indicateurs majeurs                         | Decision attendue    |
|------------|--------------------|---------------------------------------------|----------------------|
| 0-18 mois  | prototype + pilote | L/j, stabilite, securite, cout direct       | go/no-go technique   |
| 18-48 mois | pre-serie          | CAPEX unitaire, OPEX, taux utilisation      | go/no-go economique  |
| 5-15 ans   | deploiement        | eau utile territoriale, emplois, resilience | strategie de filiere |

**Tableau 3 - Exemples de lecture production (ordre de grandeur)**

| Cas                         | Production | Equivalent humain       | Equivalent irrigation etc |
|-----------------------------|------------|-------------------------|---------------------------|
| Tour 4 m - sud France type  | ~560 L/j   | ~2,8 familles (200 L/j) | ~187 m2                   |
| Tour 8 m - sud France type  | ~1372 L/j  | ~6,9 familles           | ~457 m2                   |
| Tour 20 m - sud France type | ~5219 L/j  | ~26 familles            | ~1740 m2                  |

## 1. Philosophie du projet

La philosophie centrale est un changement de logique: au lieu de creuser pour puiser dans une nappe phreatique de plus en plus incertaine, la tour hydrique condense l'air pour produire une eau locale renouvelable par cycle journalier.

Les puits internes et le puits artésien ne sont pas la source principale d'eau du système. Ce sont des options de performance selon les régions et le budget utilisateur.

Leur rôle est d'augmenter la teneur en eau utile du flux d'entrée et d'apporter un effet de refroidissement qui rapproche le noyau du point de rosée. Sans puits, la tour produit quand même de l'eau, mais avec des capacités plus modestes.

Cette eau produite en phase initiale renforce ensuite le fonctionnement de la tour: humidification locale, baisse des stress thermiques, appui à la reprise végétale. Le système s'auto-améliore donc avant même le retour complet de la végétation.

L'ambition n'est pas seulement de remplacer l'image du puits: c'est d'anticiper les sécheresses futures, de restaurer la capacité d'adaptation des territoires méditerranéens, tropicaux et désertiques, et de fournir une réponse structurelle à un réchauffement durable.

Sur le plan constructif, la tour est pensée comme une infrastructure pérenne: conception anti-sismique, blocs moulés et solidarisés, faible maintenance opérationnelle et grande robustesse tout-terrain après mise en service.

- La tour condense l'air; les puits d'accompagnement servent à améliorer le rendement, pas à remplacer le principe.
- Sans puits: production plus faible mais possible; avec puits: production accrue et fenêtre de condensation élargie.
- Objectif stratégique: sécuriser l'eau utile avant, pendant et après les épisodes de sécheresse.
- Vision long terme: revitalisation des territoires et retour progressif du vivant via l'eau produite localement.
- Logique de preuve: pilote instrumenté, mesures publiques, extension uniquement sur résultats vérifiés.

**Tableau P1 - Philosophie opérationnelle (tour versus puits)**

| Question          | Puits classique             | Tour hydrique                     | Rôle des puits d'accompagnement                                       |
|-------------------|-----------------------------|-----------------------------------|-----------------------------------------------------------------------|
| Source principale | nappe phréatique            | humidité de l'air                 | augmenter $w_{eff}$ et refroidir le cœur                              |
| Risque sécheresse | fort si nappe baisse        | réparti sur cycles atmosphériques | amortir les périodes très sèches                                      |
| Effet territorial | ponction locale             | production + relance hydrique     | sécuriser le démarrage et soutenir une production plus élevée         |
| Vision long terme | dépendance ressource locale | anticipation et résilience        | maintenir durablement une fenêtre de condensation large et productive |

## 1 bis. Ancrage historique et transposition moderne

Le projet assume une filiation intellectuelle avec l'observation de sites antiques et les travaux sur matériaux minéraux/geopolymères, sans revendiquer une vérité historique définitive.

La transposition moderne n'est pas symbolique: elle combine instrumentation contemporaine, protocole falsifiable et validation expérimentale documentée.

Des partenaires scientifiques et techniques sont essentiels pour juger la rigueur de cette transposition et la cohérence scientifique des hypothèses.

- Observation historique -> hypothèse technique.
- Hypothèse technique -> protocole mesurable.

- Protocole mesurable -> decision de deployment.

## 2. Tour hydrique: finalité et intérêt territorial

La tour hydrique est conçue comme une infrastructure passive de condensation atmosphérique: elle vise à capter de l'humidité dans l'air, la transformer en eau utile et la réinjecter dans un cycle local d'irrigation et de réserve.

Dans de nombreux contextes, elle n'a pas vocation à remplacer tout l'existant mais à réduire la pression sur les ressources conventionnelles et à sécuriser un socle d'eau utile, même en conditions dégradées.

L'intérêt stratégique est double: augmenter l'autonomie locale en eau et stabiliser les usages agricoles/humains qui dépendent aujourd'hui d'une ressource trop fragile.

Cette logique permet aussi de raisonner en dignité territoriale: moins de dépendance subie, plus de capacité locale à maintenir des activités vitales dans la durée.

- Création de réserve d'eau locale.
- Appui à l'irrigation de proximité.
- Réduction de vulnérabilité face aux sécheresses longues.

## 3. Fonctionnement détaillé de la tour (double flux)

La tour fonctionne en double flux: un flux externe ascendant porté par la géométrie et un flux interne guidé vers les zones de condensation. L'objectif est de maximiser l'échange thermique utile plutôt que la simple circulation d'air.

Le flux d'entrée humide est accéléré dans une première section Venturi, puis redirigé vers des surfaces plus froides (noyau, ailettes, paroi interne). Le passage sous le point de rosée déclenche la condensation et la récupération du condensat.

Le déflecteur supérieur et la coupole jouent un rôle décisif: séparation des couches d'air chaud/froid, réduction des pertes directes en tête, et stabilisation de la recirculation interne en régime variable.

Un second Venturi interne (plus faible) homogénéise la vitesse locale, réduit les zones mortes et augmente l'efficacité de collecte. L'anneau d'eau et le réservoir de décompression servent d'amortisseurs hydrauliques et pneumatiques.

Le cycle complet est pensé pour rester passif: aspiration basse, condensation, collecte gravitaire, stockage et réinjection locale. Les performances sont ensuite ajustées selon climat, altitude, géométrie et qualité d'instrumentation.

- Etape 1 - aspiration basse: admission de l'air ambiant sur la partie basse de la tour.
- Etape 2 - accélération primaire: Venturi d'entrée et hausse de vitesse locale.
- Etape 3 - échange thermique: contact air/parois internes plus stables thermiquement.
- Etape 4 - redirection: déflecteur sommital de la tour intérieure vers le cœur de condensation.
- Etape 5 - régulation tête: coupole supérieure pour limiter les pertes, réduire la surchauffe intérieure et permettre la sortie de l'air plus tiède par des espaces fins.
- Etape 6 - accélération secondaire: Venturi interne pour homogénéiser flux et residence time.
- Etape 7 - condensation: passage sous point de rosée et formation de condensat.
- Etape 8 - collecte: descente vers anneau d'eau puis réservoir.
- Etape 9 - stabilisation: réservoir de décompression et évacuation air résiduel.
- Etape 10 - usage: stockage gravitaire, puits ouverts/fermes, irrigation prioritaire.
- Anneau d'eau: support hygrométrique d'entrée et effet tampon.
- Réservoir de décompression: stabilité pression/débit.

### 3 bis. Valeurs de fonctionnement tour (Q/R porteur de projet)

Question 1 - A quoi servent ces parametres ? Reponse: a relier chaque choix de geometrie a un niveau de production d'eau lisible avant engagement financier.

Question 2 - Quelle chaine physique faut-il retenir ? Reponse: geometrie -> circulation d'air -> refroidissement du coeur -> condensation -> litres par jour.

Question 3 - Pourquoi la hauteur est-elle determinante ? Reponse: elle conditionne le diametre utile, donc le debit d'air traite et la surface de condensation mobilisable.

Question 4 - Peut-on decider uniquement sur ces chiffres ? Reponse: non, ils servent au cadrage; la decision finale exige un pilote instrumente avec mesures continues.

- Hauteur modele: H de 3 a 110 m.
- Diametre interne principal:  $D_i = 2,8 \times \sqrt{H/8}$  [m].
- Exemples: H=8 m ->  $D_i=2,80$  m ; H=20 m ->  $D_i=4,43$  m ; H=50 m ->  $D_i=7,00$  m ; H=110 m ->  $D_i=10,4$  m.
- Noyau:  $D_{\text{noyau}} = 0,218 \times D_i$ .
- 2-flux:  $D_{\text{int}} = 0,565 \times D_i$  ;  $Se_B = 0,40 \times Se_A$  (continuite de vitesse).
- 4-flux:  $D1=0,849 \times D_i$  ;  $D2=0,780 \times D_i$  ;  $D3=0,573 \times D_i$  ;  $Se_D = Se_C$ .
- Venturi forts: canal A C=1,6 ; canal C C=1,4.
- Venturi faibles: canaux B et D C=1,2.
- Coefficients de design condensation:  $c_{\text{deflecteur}}=1,12$  ;  $c_{\text{ailettes}}=1,50$  ;  $c_{\text{trou}}=1,32$  ; total=2,22.
- Stabilité couloirs: seuil pratique  $V > 0,05$  m/s.
- Indicateurs operationnels: production L/j, pic L/h, heures productives par jour.
- Traduction porteur de projet: plus la geometrie est stable et le noyau refroidi, plus la fenetre de condensation s'ouvre longtemps dans la journee.

**Tableau 3 bis-A - Comment lire les parametres (version litterale)**

| Parametre           | Ce que cela represente | Impact direct              | Question porteur de projet associee        |
|---------------------|------------------------|----------------------------|--------------------------------------------|
| H                   | hauteur de tour        | potentiel de tirage        | quelle echelle de production viser ?       |
| $D_i$               | diametre principal     | debit d'air admissible     | combien d'air peut etre traite ?           |
| $D_{\text{noyau}}$  | diametre coeur froid   | surface de condensation    | le coeur peut-il tenir le point de rosee ? |
| Sections 2/4 flux   | passages internes      | vitesse/residence de l'air | rendement stable ou non ?                  |
| Coeff. condensation | gain de collecte       | litres recuperes           | quels gains sans changer la hauteur ?      |

**Tableau 3 bis-B - Echelles typiques de dimensionnement**

| Hauteur | $D_i$ approx. | Lecture d'usage         | Niveau de complexite |
|---------|---------------|-------------------------|----------------------|
| 4 m     | ~1,98 m       | demonstrateur / habitat | faible               |
| 8 m     | ~2,80 m       | village compact         | faible a moyenne     |
| 20 m    | ~4,43 m       | village et irrigation   | moyenne              |
| 50 m    | ~7,00 m       | plateforme territoriale | elevee               |
| 110 m   | ~10,4 m       | infrastructure majeure  | tres elevee          |

### 3 ter. Exemples probabilistes de production (Q/R porteur de projet)

Question 1 - Pourquoi parle-t-on de probabilite ? Reponse: parce que la production depend de la duree reelle pendant laquelle le coeur passe sous le point de rosee.

Question 2 - Que se passe-t-il sans cette fenetre ? Reponse: la tour fait circuler de l'air mais condense peu, donc la production utile reste faible.

Question 3 - A quoi servent les puits internes et le puits artésien ? Reponse: a augmenter l'humidite effective et a refroidir le coeur pour elargir la fenetre de condensation.

Question 4 - Comment un porteur de projet utilise ce chapitre ? Reponse: classer le site en probabilite forte/moyenne/faible puis choisir l'option technique et le pilote adaptes.

- Probabilite forte de condensation utile: RH nocturne elevee, vent 2-6 m/s, amplitude jour/nuite 10-18 C,  $T_{\text{noyau}} < T_{\text{rosee}}$  pendant plusieurs heures.
- Probabilite moyenne: semi-aride avec nuits fraiches, RH nocturne moyenne et fenetres de vent intermittentes; la production existe mais varie davantage d'un jour a l'autre.
- Probabilite faible sans assistance hygrometrique: air tres sec durable ( $w < 3$  g/kg), vent faible, faible amplitude thermique ou coeur insuffisamment refroidi en phase initiale.
- Point physique cle: si de l'eau condensee est observee, c'est bien que le coeur est plus froid que l'air interne et qu'il atteint localement la condition de rosee.
- Exemple desert chaud:  $T_{\text{moy}}=40$  C,  $HR=15$  %  $\rightarrow T_{\text{nuite}} \sim 27,5$  C,  $HR_{\text{nuite}} \sim 29$  % ; condensation naturelle possible la nuit, mais reserve faible si l'humidite absolue reste basse.
- Exemple Sahel sec: sans puits,  $w < 3$  g/kg  $\rightarrow \Delta w$  proche de 0 donc production faible ou nulle ; avec 12 puits,  $w_{\text{eff}} \sim 11$  g/kg  $\rightarrow \Delta w \sim 4$  g/kg, scenario redevenant exploitable.
- Exemple tropical humide:  $HR \sim 80$  %,  $w_{\text{ext}} \sim 20$  g/kg,  $w_{\text{sat}}(15 \text{ C}) \sim 11$  g/kg  $\rightarrow \Delta w \sim 9$  g/kg ; probabilite de production utile elevee si le noyau reste froid et la collecte stable.
- Convention porteur de projet pour lire les exemples: besoin humain minimal = 50 L/j/personne ; famille de 4 = 200 L/j ; irrigation d'ete en goutte-a-goutte =  $\sim 3$  L/m<sup>2</sup>/j.
- Sud de la France type Montpellier (modele:  $T=20$  C ;  $HR=62$  % ; vent=4 m/s), tour 4 m  $\rightarrow \sim 560$  L/j ; une famille de 4 recoit  $\sim 140$  L/j/personne ; surplus irrigation  $\sim 360$  L/j  $\rightarrow \sim 187$  m<sup>2</sup> en etc.
- Sud de la France type Montpellier, tour 8 m  $\rightarrow \sim 1372$  L/j ; une famille de 4 recoit  $\sim 343$  L/j/personne ; surplus irrigation  $\sim 1170$  L/j  $\rightarrow \sim 457$  m<sup>2</sup> en etc.
- Sud de la France type Montpellier, tour 20 m  $\rightarrow \sim 5219$  L/j ; equivalent  $\sim 26$  familles de 4 au besoin minimal, ou  $\sim 1740$  m<sup>2</sup> irrigues en etc.
- Mali type Bamako/Sahel (modele:  $T=34$  C ;  $HR=30$  % ; vent=4,5 m/s), tour 20 m  $\rightarrow \sim 45438$  L/j ; lecture simple:  $\sim 15146$  m<sup>2</sup> irrigues en ete ou  $\sim 227$  familles de 4 au minimum vital.
- Ethiopie orientale type Dire Dawa (modele:  $T=35$  C ;  $HR=22$  % ; vent=5 m/s), tour 20 m  $\rightarrow \sim 68335$  L/j ; lecture simple:  $\sim 22778$  m<sup>2</sup> irrigues en ete ou  $\sim 341$  familles de 4 au minimum vital.
- Lecture porteur de projet: classer d'abord les sites en probabilite forte / moyenne / faible, puis choisir le pilote et la configuration puits adaptes.
- Les volets gouvernance, mutualisation publique et philosophie generale sont traites plus loin dans les chapitres 7, 8 bis, 10 et 11 afin de ne pas melanger lecture climatique et lecture institutionnelle.

**Tableau 3 ter-A - Classe de probabilite et action recommandee**

| Classe  | Conditions dominantes                                  | Effet attendu        | Action porteur de projet              |
|---------|--------------------------------------------------------|----------------------|---------------------------------------|
| Forte   | RH nocturne elevee + vent stable + bon refroidissement | production reguliere | demarrer pilote rapidement            |
| Moyenne | RH intermediaire + fenetres de vent                    | production variable  | pilote avec instrumentation renforcee |
| Faible  | air tres sec + coeur insuffisamment refroidi           | production limitee   | activer option puits avant extension  |

**Tableau 3 ter-B - Effet des options d'accompagnement sur la fenetre de condensation**

| Configuration                    | Humidite effective     | Refroidissement coeur | Impact sur probabilite                    |
|----------------------------------|------------------------|-----------------------|-------------------------------------------|
| Tour standard (anneau inclus)    | base                   | base                  | depend fortement du climat local          |
| Tour + puits internes            | hausse moyenne a forte | moderee               | reclasse souvent faible->moyenne          |
| Tour + puits artisien            | hausse forte           | forte                 | peut reclasser moyenne->forte             |
| Tour + puits internes + artisien | hausse maximale        | forte                 | performance la plus robuste en climat sec |

**Tableau 3 ter-C - Lecture climatique strategique**

| Zone            | Risque secheresse          | Role de la tour            | Effet territorial vise              |
|-----------------|----------------------------|----------------------------|-------------------------------------|
| Mediterraneenne | ete long et sec            | securiser eau utile locale | stabiliser agriculture de proximite |
| Tropicale       | variabilite inter-saison   | lisser les deficits        | continuite des usages critiques     |
| Desertique      | stress hydrique structurel | creer socle d'eau minimal  | revitalisation progressive          |

## 4. D-R-M (disrupteur/recombinant moleculaire): role et temporalite

Le D-R-M (disrupteur/recombinant moleculaire) est l'outil de construction de la tour. Sa fonction principale est temporaire: extraire la matiere, former les blocs moules et vitrifier les surfaces utiles pendant la phase chantier.

Une fois la tour construite et stabilisee, la tour devient l'actif permanent du territoire. Le D-R-M peut ensuite etre deplace vers un autre site pour construire d'autres tours ou d'autres ouvrages.

La logique economique est donc dissociee: actif mobile temporaire (D-R-M) versus infrastructure fixe de long terme (tour).

Pourquoi D-R-M plutot qu'un concassage classique: sur des chantiers parfois loin des carrieres, transformer le granite en poudre/granulat calibrable transportable en vrac est souvent plus simple et moins couteux que de manipuler des blocs massifs a tailler sur place.

Point logistique cle: a masse egale, le vrac atteint plus facilement la charge utile camion avec moins d'espace perdu qu'un chargement en blocs irreguliers; en contrepartie il faut maitriser humidite, envol de poussieres et confinement.

- Fonction 1: extraction/fragmentation de granite (phase 01).
- Fonction 2: formation et cure de blocs moules (phase 02).
- Fonction 3: vitrification de surface et durabilite (phase 03).
- Apres chantier: transfert du D-R-M vers une nouvelle zone de besoin.
- Chantier lourd: support mecanise du D-R-M, protection operateur, aspiration et protocole bruit/fatigue sont requis.

**Tableau 4-A - Separation des roles (outil mobile vs tour permanente)**

| Element             | Nature       | Duree      | Role principal                    |
|---------------------|--------------|------------|-----------------------------------|
| D-R-M               | mobile       | temporaire | construire et qualifier les blocs |
| Tour hydrique       | fixe         | long terme | produire l'eau localement         |
| Equipe chantier     | mobile       | temporaire | assembler et instrumenter         |
| Exploitation locale | territoriale | continue   | piloter la production et l'usage  |

**Tableau 4-B - D-R-M vs concassage classique (lecture chantier)**

| Critere               | D-R-M                             | Concassage classique      | Lecture porteur de projet                  |
|-----------------------|-----------------------------------|---------------------------|--------------------------------------------|
| Matiere sortie        | sable calibrable                  | bloc/concasse grossier    | avantage D-R-M pour moulage                |
| Transport             | vrac poudre/granulat (benne/silo) | blocs massifs + chargeur  | logistique allgee et plus de tonnage utile |
| Site eloigne carriere | operation mobile                  | chaîne lourde             | avantage mobilite                          |
| Bruit/fatigue         | pilotable avec protocole          | souvent eleves en continu | exiger protection operateur                |
| Usage multi-sites     | outil deplacable                  | installation plus fixe    | 1-2 D-R-M accelerent plusieurs tours       |



## 4 bis. Outil - debit utile, cadence et ce qu'on peut reconstruire

Question litterale 1: a quoi sert le D-R-M sur un site ? Reponse: produire rapidement des blocs conformes pour construire la tour dans un delai maitrise.

Question litterale 2: que mesure un porteur de projet ? Reponse: tonnes/heure, blocs/heure, niveaux de tour/semaine et cout direct de production.

Question litterale 3: le D-R-M reste-t-il sur place ? Reponse: pas necessairement; apres construction, il peut etre redeploie vers un autre chantier.

- Phase 01 - debit matiere: 3 kW ~535 kg/h ; 6 kW ~1070 kg/h ; 12 kW ~2140 kg/h ; 20 kW ~3570 kg/h.
- Bloc de reference reconstruction: 40 x 35 x 35 cm -> volume ~0,049 m<sup>3</sup> -> masse ~100 kg -> face utile mur ~0,14 m<sup>2</sup> a 35 cm d'epaisseur.
- La phase 01 fournit environ 5,3 blocs/h en 3 kW et 10,7 blocs/h en 6 kW ; elle alimente deja plusieurs postes de moulage en parallele.
- Le goulet d'etranglement reel est la phase 02: en lecture chantier, appui conditionnel possible vers ~1,5-2,0 h puis cycle nominal ~2,0-2,5 h; la cadence depend donc du nombre de moules en rotation.
- 4 moules en rotation -> ~1,6 bloc/h ; 8 moules -> ~3,2 blocs/h ; 12 moules -> ~4,8 blocs/h.
- Equivalent surface de mur reconstruite: 4 moules -> ~0,22 m<sup>2</sup>/h ; 8 moules -> ~0,45 m<sup>2</sup>/h ; 12 moules -> ~0,67 m<sup>2</sup>/h.
- Equivalent journalier sur 8 h actives: 4 moules -> ~1,8 m<sup>2</sup> de face ; 8 moules -> ~3,6 m<sup>2</sup> ; 12 moules -> ~5,4 m<sup>2</sup>.
- Lecture chantier: le debit laser n'est plus la limite une fois la phase 01 stabilisee; la limite devient l'organisation du nombre de moules et de postes de cure.
- Avec 1 a 2 D-R-M bien organises sur site, la vitesse de construction augmente fortement: un module alimente, l'autre securise la continuite de cadence.

**Tableau 4 bis-A - Cadence lisible par porteur de projet**

| Configuration | Debit matiere | Blocs/h (ordre de grandeur) | Lecture chantier           |
|---------------|---------------|-----------------------------|----------------------------|
| 3 kW          | ~535 kg/h     | ~5,3                        | demarrage/chantier compact |
| 6 kW          | ~1070 kg/h    | ~10,7                       | cadence renforcee          |
| 12 kW         | ~2140 kg/h    | ~21,4                       | multi-postes               |

**Tableau 4 bis-B - Fonction temporaire du D-R-M**

| Phase | Objectif            | Sortie            | Statut apres chantier |
|-------|---------------------|-------------------|-----------------------|
| 01    | extraire/fragmenter | granulat conforme | outil deplace         |
| 02    | mouler/solidifier   | blocs empilables  | outil deplace         |
| 03    | vitrier/proteger    | surface durable   | outil deplace         |

**Tableau 4 bis-C - Exigences chantier lourd D-R-M**

| Sujet                | Exigence minimale           | Impact                    |
|----------------------|-----------------------------|---------------------------|
| Support outil        | bras/support decharge       | baisse fatigue residuelle |
| Protection operateur | EPI complet + protocoles    | securite continue         |
| Bruit                | zones et horaires maitrises | acceptabilite locale      |
| Aspiration           | capture fines + filtration  | qualite air chantier      |
| Redondance           | 1 ou 2 D-R-M selon cadence  | vitesse et robustesse     |

## 4 ter. Exemples concrets de reconstruction de mur

Cette section donne enfin une visualisation chantier: que peut-on refaire, en combien de temps, et avec quelle organisation minimale.

Les durees ci-dessous sont des durees d'equipe active, hors aleas logistiques, hors arrêts securite et hors reconfiguration majeure du site.

- Reparation locale: mur de 2 m x 2 m x 0,35 m -> volume ~1,40 m<sup>3</sup> -> ~29 blocs -> ~2,9 t de matiere. Avec 8 moules (~3,2 blocs/h), duree active ~9 h de production/bloc.
- Mur agricole: 5 m x 2,5 m x 0,35 m -> volume ~4,38 m<sup>3</sup> -> ~89 blocs -> ~8,9 t. Avec 8 moules, duree active ~28 h ; avec 12 moules, ~19 h.
- Mur porteur important: 10 m x 3 m x 0,35 m -> volume ~10,5 m<sup>3</sup> -> ~214 blocs -> ~21,4 t. Avec 8 moules, duree active ~67 h ; avec 12 moules, ~45 h.
- Lecture operationnelle: a 3 kW, la production de sable (~535 kg/h) couvre deja ~5 blocs/h, donc un chantier a 8 moules reste alimentable; a 6 kW, la marge chantier augmente fortement.
- Lecture niveau de tour: si un anneau ou un niveau complet represente 20 a 30 blocs, une equipe bien organisee peut viser un niveau en ~2 a 3 h de cycle de cure, ce qui rejoint la logique du protocole chantier decrite sur le site.
- Vitesse de solidification operationnelle (mode optimise): appui chantier possible vers ~1,5-2,0 h (surface ~150-180 MPa), puis pose nominale vers ~2,0-2,5 h (surface ~195-210 MPa ; coeur ~52-62 MPa).
- Effet de superposition: la pose du bloc superieur augmente la compression du bloc inferieur en cure, ce qui renforce progressivement sa durete interne.
- Hypothese tour pour lecture chantier: exemple du site = niveau a 8 blocs ; bloc type ~100 kg ; hauteur de bloc ~0,35 m.
- Rappel critique de cadence: en mode sequentiel strict (sans rotation), 2 h par bloc donnent deja ~16 h pour un niveau de 8 blocs; c'est cette lecture conservative qui doit cadrer le risque planning.
- Tour 10 m (lecture theorique concrete): ~29 niveaux -> ~232 blocs -> ~23,2 t de matiere. Phase 01 seule: ~43 h d'alimentation en 3 kW ou ~22 h en 6 kW. Montage: sequentiel ~464 h (2 h/bloc) ; rotation optimisee ~58 a 87 h (2 a 3 h/niveau).
- Tour 20 m (lecture theorique concrete): ~58 niveaux -> ~464 blocs -> ~46,4 t de matiere. Phase 01 seule: ~87 h en 3 kW ou ~43 h en 6 kW. Montage: sequentiel ~928 h (2 h/bloc) ; rotation optimisee ~116 a 174 h (2 a 3 h/niveau).
- Dalle granitique et base structurelle: ajouter un lot de temps specifique (implantation, preparation, coulage/base) avant empiement des niveaux; ce lot n'etait pas inclus dans les chiffres precedents.
- Lecture porteur de projet: ce chapitre traite le temps chantier et la cadence physique. Les couts, CAPEX/OPEX et l'energie mobile sont consolides plus loin dans les chapitres 8 bis, 13, 14 et 15.

**Tableau 4 ter-A - Lecture tour complete (10 m vs 20 m) - cadence corrige**

| Tour | Niveaux/Blocs | Masse   | t <sub>alim</sub> 3 kW | Montage sequentiel (2 h/bloc) | Montage rotation (2-3 h/niveau) |
|------|---------------|---------|------------------------|-------------------------------|---------------------------------|
| 10 m | ~29 / ~232    | ~23,2 t | ~43 h                  | ~464 h                        | ~58 a 87 h                      |
| 20 m | ~58 / ~464    | ~46,4 t | ~87 h                  | ~928 h                        | ~116 a 174 h                    |

**Tableau 4 ter-B - Message strategique (outil vs actif final)**

| Element | Horizon     | Valeur creee             | Decision              |
|---------|-------------|--------------------------|-----------------------|
| D-R-M   | court terme | vitesse de construction  | allouer et deplacer   |
| Tour    | long terme  | production d'eau durable | exploiter et proteger |

**Tableau 4 ter-C - Cycle de solidification et pose bloc suivant**

| Temps    | Etat bloc courant       | Action                     | Effet sur bloc inferieur |
|----------|-------------------------|----------------------------|--------------------------|
| 0 h      | coulage/activation      | demarrage cure             | n/a                      |
| ~2-2,5 h | seuil empiement atteint | pose bloc suivant possible | debut compression utile  |
| ~4 h     | coeur renforce          | cycle continu              | durete interne en hausse |
| ~7 j     | stabilisation haute     | etat quasi final           | consolidation durable    |

**Tableau 4 ter-D - Lots de temps hors empiement (a ajouter au planning)**

| Lot chantier                       | Inclus dans 4 ter-A | Ordre de grandeur | Commentaire                 |
|------------------------------------|---------------------|-------------------|-----------------------------|
| Implantation et preparation site   | non                 | variable          | depend acces et topographie |
| Dalle granitique/base structurelle | non                 | variable          | prealable obligatoire       |
| Mise en service D-R-M et securite  | partiel             | variable          | support operateur + EPI     |
| Empilement niveaux                 | oui                 | voir 4 ter-A      | sequentiel vs rotation      |

## 5. Pourquoi un laser impulsif et un pilotage harmonique

Le laser impulsif est privilégié pour concentrer l'énergie temporelle, éviter une fusion continue non souhaitée et exploiter des fenêtres d'interaction compatibles avec la matière à traiter.

Le pilotage fréquentiel repose sur l'identification de pics de réponse vibro-acoustique du matériau local, puis le calage contrôlé du laser sur des zones harmoniques efficaces.

Cette approche est adaptative: elle n'impose pas des fréquences universelles, elle apprend les signatures de chaque granite et ajuste les paramètres en boucle fermée.

Lecture littérale porteur de projet: cette brique sert uniquement à construire mieux et plus vite. Elle n'est pas nécessaire au fonctionnement de la tour une fois la tour terminée.

- Lecture automatique des pics par FFT/STFT.
- Optimisation contrainte (sécurité thermique, PRF, énergie impulsion).
- Validation par gain mesuré de débit et stabilité granulométrique.

**Tableau 5-A - Ce que le pilotage harmonique apporte**

| Sans pilotage     | Avec pilotage             | Impact chantier |
|-------------------|---------------------------|-----------------|
| reglage fixe      | reglage adaptatif         | moins de pertes |
| variabilite forte | stabilite granulometrique | qualite bloc    |
| rendement moyen   | rendement augmente        | delai reduit    |

## 6. Conception, faisabilité et niveaux de déploiement

Le projet distingue volontairement un outil de base (3 kW) et un outil de production renforcée (6 kW), afin de couvrir des contextes de terrain différents sans surdimensionner systématiquement le CAPEX.

La faisabilité ne se juge pas seulement sur la technique: elle dépend aussi du modèle d'exploitation, de la mutualisation inter-chantiers et de la qualité de l'organisation opérationnelle.

Le cadre recommandé est progressif: prototype instrumenté, pilote borné, extension conditionnée aux KPI atteints.

Lecture littérale porteur de projet: on commence avec l'outil adapté au budget puis on monte en puissance si les indicateurs terrain confirment la performance.

- 3 kW: entrée de gamme opérationnelle.
- 6 kW: cadence renforcée et marge matériau.
- Go/No-Go fondé sur mesures, pas sur promesse.

**Tableau 6-A - Choix outil selon budget et contexte**

| Contexte             | Choix initial | Condition de passage niveau supérieur | Décision                |
|----------------------|---------------|---------------------------------------|-------------------------|
| budget contraint     | 3 kW          | KPI stables sur pilote                | monter à 6 kW si besoin |
| budget intermédiaire | 3 ou 6 kW     | charge chantier élevée                | renforcer capacité      |
| zones critiques      | 6 kW          | vérification sécurité/exploitation    | déployer rapidement     |

## 7. Cadre économique et point mort

Les coûts estimés montrent qu'un modèle bien utilisé peut atteindre un point mort en fenêtre raisonnable, à condition de maintenir un taux d'utilisation élevé et une discipline opérationnelle stricte.

Le principal risque économique est la sous-utilisation. Le principal levier est la mutualisation: un outil actif sur plusieurs sites crée une valeur cumulée que les modèles unitaires n'atteignent pas.

Le volet énergétique doit être paramétré par région: solaire dominant là où il est robuste, hybride ailleurs, avec batteries et appoint sécurisé selon criticité.

- CAPEX piloté par modularité et reconditionné qualifié.
- OPEX piloté par maintenance préventive et qualité d'exploitation.
- Rentabilité pilotée par plan de charge réel.

## 8 bis. Valeurs financières décisionnelles (outil complet)

Le premier enjeu financier n'est pas la marge finale, mais la capacité à construire un prototype crédible à coût maîtrisé pour sortir de la spéculation technique.

L'objectif industriel aligné est ensuite la descente de coût vers un outil abordable pour collectivités, villages et usages domestiques. Si l'outil reste plus cher qu'un camion utilitaire, la diffusion des tours restera marginale.

Scénario prioritaire de politique publique: acquisition de D-R-M par l'Etat/collectivités puis mise à disposition mutualisée d'équipes opérationnelles. Dans ce schéma, la charge directe locale est fortement réduite.

Le dossier distingue donc trois niveaux: prototype R&D; (preuve technique), pré-série (standardisation), série (coût cible de diffusion).

- Prototype R&D; portatif phase 01: ~42 à 165 kEUR selon intégration et sécurisation.
- Outil complet opérationnel (référence actuelle): 3 kW ~79 à 166 kEUR ; 6 kW ~112 à 222 kEUR (plages hautes transitoires de pré-série et d'intégration).
- Cible de diffusion hors prototype: coût nettement plus bas via standardisation, achats en volume, reconditionné qualifié et mutualisation publique.
- Cible stratégique de diffusion: baisser le coût unitaire vers un niveau comparable à un véhicule utilitaire équipé.
- Point clé de compétitivité: plateforme standardisable, sous-ensembles industrialisables, achats volumes en pré-série.
- Scénario de coût: prototype intégré en Europe (coût haut) versus version standardisée de série (coût bas) avec composants globaux qualifiés.

## 10. Intérêt politique, écologique, humanitaire et économique

Intérêt politique: le projet donne aux territoires une capacité visible de construction utile. Il permet de passer d'une logique d'urgence récurrente à une logique d'infrastructure locale gouvernable, avec des objectifs clairs et des résultats auditables.

Intérêt écologique: la tour repose majoritairement sur des mécanismes passifs (tirage thermique, condensation, gravité). Cette architecture réduit la dépendance à l'énergie fossile quand le mix local est bien configuré et limite les impacts d'une infrastructure lourde centralisée.

Intérêt humanitaire: l'accès local à l'eau renforce la sécurité des usages essentiels (boisson, hygiène, irrigation de base), diminue la vulnérabilité des familles en période de stress hydrique et réduit l'exposition aux ruptures logistiques.

Intérêt économique: le couplage tour + outil crée une filière technique locale (fabrication, exploitation, maintenance, contrôle météorologique). Cette filière peut produire de l'emploi qualifié, des compétences transférables et une base économique de long terme autour de l'eau.

## 11. Décision demandée et feuille de route

La décision attendue n'est pas une validation aveugle du modèle: c'est l'autorisation d'un pilote instrumenté, borné, transparent et auditable.

Feuille de route recommandée: 1) cadrage site et protocole, 2) exécution pilote, 3) publication des résultats, 4) revue tierce, 5) décision d'échelle sur KPI.

Cette méthode permet d'éviter le placard autant que la précipitation: agir vite, mesurer proprement, décider sur preuves.

Une décision utile est une décision qui reste gouvernable: objectifs clairs, indicateurs publics, responsabilités explicites, et capacité de corriger sans perdre le cap stratégique.

- Pilote instrumenté (site, budget, durée, KPI).
- Tableau de bord mensuel public.
- Go/No-Go fondé sur seuils pré-enregistrés.

## 12. Annexe porteurs de projet - parametres outil et hypotheses de production

Cette annexe consolide les hypotheses de calcul utilisees pour l'outil afin de rendre les arbitrages budgetaires et calendaires lisibles.

Les valeurs restent a confirmer en pilote instrumente mais elles donnent une base mesurable pour comparer les scenarios.

- Hypotheses phase 01: rendement transfert 15 %, energie fragmentation  $\sim 8 \text{ J/cm}^3$ , densite granite  $2,65 \text{ kg/L}$ .
- Debits indicatifs phase 01: 3 kW  $\sim 535 \text{ kg/h}$  ; 6 kW  $\sim 1070 \text{ kg/h}$  ; 12 kW  $\sim 2140 \text{ kg/h}$  ; 20 kW  $\sim 3570 \text{ kg/h}$ .
- Bloc reference:  $40 \times 35 \times 35 \text{ cm}$  ; volume  $\sim 0,049 \text{ m}^3$  ; masse  $\sim 100 \text{ kg}$ .
- Cadence de base phase 02: fenetre terrain 1,5-4 h selon conditions ; cible nominale  $\sim 2,5 \text{ h}$  ; cadence porteur de projet = nombre de moules / 2,5.
- Ancrage annexe site pour validation: <https://www.terre-resilience.fr/lexique.php#phase02> (F-05 a F-10), #hypotheses (borne 1,5-4 h) et #matériaux (MAT-01).

**Tableau A - Debits phase 01 selon puissance**

| Configuration | P_eff  | Debit volumique        | Debit massique           | Lecture chantier  |
|---------------|--------|------------------------|--------------------------|-------------------|
| 3 kW          | 450 W  | $\sim 202 \text{ L/h}$ | $\sim 535 \text{ kg/h}$  | Portable          |
| 6 kW          | 900 W  | $\sim 405 \text{ L/h}$ | $\sim 1070 \text{ kg/h}$ | Cadence renforcee |
| 12 kW         | 1800 W | $\sim 810 \text{ L/h}$ | $\sim 2140 \text{ kg/h}$ | Infrastructure    |

## 13. Annexe porteurs de projet - CAPEX, OPEX et trajectoire de cout

Le pilotage financier doit d'abord valider la sortie de R&D;, puis la descente de cout vers un produit diffusible.

La logique d'investissement recommande un passage par lots: prototype -> pre-serie -> serie standardisee.

- Reference couts actuels: 3 kW  $\sim 79\text{-}166 \text{ kEUR}$  ; 6 kW  $\sim 112\text{-}222 \text{ kEUR}$ .
- Cout direct horaire: 3 kW  $\sim 55\text{-}90 \text{ EUR/h}$  ; 6 kW  $\sim 80\text{-}130 \text{ EUR/h}$ .
- La serie doit viser un cout compatible collectivite, inferieur aux equipements lourds non accessibles localement.

**Tableau B - Niveaux de cout et usage cible**

| Niveau            | Objet          | Plage de cout                          | Usage              |
|-------------------|----------------|----------------------------------------|--------------------|
| Prototype         | Validation R&D | $\sim 42 \text{ a } 165 \text{ kEUR}$  | preuve technique   |
| Operationnel 3 kW | outil complet  | $\sim 79 \text{ a } 166 \text{ kEUR}$  | domestique/village |
| Operationnel 6 kW | outil complet  | $\sim 112 \text{ a } 222 \text{ kEUR}$ | village/ville      |

## 14. Annexe porteurs de projet - tours 10 m et 20 m (temps et cout direct)

Cette annexe convertit les parametres de l'outil en lecture chantier de tour complete.

Les chiffres sont theoriques et servent a cadrer le pilote: ils ne remplacent pas un metrage chantier instrumente.

- Hypothese geometrique chantier: hauteur de bloc ~0,35 m ; 8 blocs par niveau (exemple de rotation du site).
- Hypothese de masse: ~100 kg par bloc.
- Hypothese de montage: 2 a 3 h par niveau en organisation optimisee.

**Tableau C - Exemple tour complete**

| Tour | Niveaux | Blocs | Masse   | t_alim 3 kW | t_alim 6 kW | t_montage    |
|------|---------|-------|---------|-------------|-------------|--------------|
| 10 m | ~29     | ~232  | ~23,2 t | ~43 h       | ~22 h       | ~58 a 87 h   |
| 20 m | ~58     | ~464  | ~46,4 t | ~87 h       | ~43 h       | ~116 a 174 h |

**Tableau D - Cout direct machine (hors genie civil)**

| Tour | 3 kW            | 6 kW            | Hypothese                    |
|------|-----------------|-----------------|------------------------------|
| 10 m | ~2,4 a 3,9 kEUR | ~1,8 a 2,9 kEUR | cout_horaire_direct x t_alim |
| 20 m | ~4,8 a 7,8 kEUR | ~3,4 a 5,6 kEUR | cout_horaire_direct x t_alim |

## 15. Annexe porteurs de projet - energie mobile et faisabilite operationnelle

La faisabilite terrain depend de l'energie disponible, du plan de charge et de la discipline de maintenance.

La consommation mesurable minimale est la puissance laser seule; la consommation reelle ajoute les auxiliaires (chiller, aspiration, commande).

- $E_{min} = P_{laser} \times t$  ; 3 kW sur 8 h = 24 kWh minimum ; 6 kW sur 8 h = 48 kWh minimum.
- La reserve terrain recommandee est superieure a  $E_{min}$  pour absorber chiller, aspiration, commande et pertes.
- Batteries utiles de reference: 80 a 180 kWh selon profil chantier.
- Le mix recommande reste region-dependant: solaire dominant en zones favorables, hybride ailleurs.

**Tableau E - Energie et architecture mobile**

| Element          | Plage          | Role                |
|------------------|----------------|---------------------|
| Batteries utiles | 80 a 180 kWh   | autonomie chantier  |
| Solaire embarque | 1,5 a 4 kWc    | appoint journalier  |
| Secours          | bio/GNV option | continuite critique |

## 16. Autorisations et conformité - lecture par acteur

La faisabilite ne depend pas seulement de la physique. Elle depend aussi du cadre legal: usage du sol, permis de construire, eau, environnement, securite chantier et logistique lourde.

Les exigences ne sont pas identiques pour un particulier, une mairie, une entreprise ou un programme porte par ONG. Le dossier fixe donc une grille d'autorisation par profil d'acteur.

Les fourchettes de cout et delai ci-dessous sont des ordres de grandeur de cadrage international; elles doivent etre confirmees juridiquement par pays, region et commune avant engagement.

- Bloc legal minimal quasi universel: foncier + urbanisme + eau + environnement + securite chantier.
- Bloc technique obligatoire: note geotechnique simplifiee, plan de masse, notice de securite, plan de gestion de l'eau produite.
- Bloc logistique: autorisations de transport/levage pour elements lourds et fenetres horaires de chantier.
- Principe de prudence: aucun chiffre de cout administratif n'est fige sans validation locale ecrite.

**Tableau F - Autorisations minimales selon profil**

| Profil              | Autorisations typiques                          | Delai indicatif | Cout administratif indicatif |
|---------------------|-------------------------------------------------|-----------------|------------------------------|
| Particulier         | urbanisme + eau + securite locale               | 1-6 mois        | ~0,5 a 8 kEUR eq.            |
| Mairie/collectivite | urbanisme + environnement + marche public       | 3-12 mois       | ~5 a 50 kEUR eq.             |
| Entreprise          | urbanisme + eau + HSE + assurance               | 2-10 mois       | ~10 a 120 kEUR eq.           |
| Programme ONG       | accord local + autorites + conformite bailleurs | 2-9 mois        | ~5 a 80 kEUR eq.             |

**Tableau F bis - Differences geographiques (cadrage)**

| Zone                 | Point fort                  | Point de vigilance          | Lecture porteur de projet    |
|----------------------|-----------------------------|-----------------------------|------------------------------|
| Europe               | cadre juridique stable      | delais et etudes prealables | forte traçabilité            |
| USA/Mexique          | capacite projet elevee      | zoning + droits d'eau       | verifier niveau local        |
| Maroc/Egypte/Arabie  | capacite d'arbitrage public | procedure par province      | sponsor institutionnel utile |
| Mali/Soudan/Ethiopie | impact social direct eleve  | risque contexte/logistique  | gouvernance locale critique  |

## 17. Cout reel de la tour - matiere, transport, autorisations

Le cout de la tour peut rester faible en matiere brute locale, surtout si la roche est accessible et si la transformation est localisee. Le poste qui explose le plus souvent est la chaine transport + autorisations + organisation chantier.

Le D-R-M est strategique car il diminue le cout de transformation et de manutention lourde: on bascule d'une logique blocs massifs difficiles a tailler vers une logique granulat/moulage plus mobile.

Dans la plupart des cas, transporter en poudre/granulat vrac est economiquement plus efficace que transporter des blocs: moins de manutention, moins d'espaces vides, chargement/dechargement plus rapide, et meilleur taux d'utilisation des camions.

Le pilotage financier doit donc distinguer: cout matiere (tonne), cout logistique (km et acces), cout administratif (permis), cout chantier (equipe), cout qualite (instrumentation et controle).

- Point cle: la matiere ne suffit pas a estimer le projet; le cout total est systemique.
- Levier majeur: extraction/transformation rapide locale pour reduire transport et dependance industrielle.
- Nuance logistique: le vrac a une densite apparente inferieure a la roche pleine, mais la chaine globale reste souvent moins couteuse que des blocs irreguliers.
- Lecture de risque: en zone pauvre, la contrainte peut etre moins le materiau que l'accès administratif et la logistique saisonniere.

**Tableau G - Decomposition du cout total (ordre de grandeur)**

| Poste                    | Part possible du total | Sensibilite | Levier                         |
|--------------------------|------------------------|-------------|--------------------------------|
| Matiere granite          | 10-35 %                | moyenne     | acces local + recuperation     |
| Transport/logistique     | 15-40 %                | elevée      | chaîne courte + plan de charge |
| Autorisations/conformite | 5-20 %                 | elevée      | dossier propre en amont        |
| Chantier et pose         | 20-45 %                | elevée      | cadence moules + equipe        |
| Controle/instrumentation | 5-15 %                 | moyenne     | kit metrologique standard      |

**Tableau G bis - Effet strategique du D-R-M sur les couts**

| Sans D-R-M                          | Avec D-R-M                             | Impact porteur de projet            |
|-------------------------------------|----------------------------------------|-------------------------------------|
| taille/transport lourd de blocs     | vrac poudre/granulat + moulage local   | baisse cout transform. + logistique |
| espaces vides et manutention lourde | chargement vrac plus dense en pratique | meilleur tonnage utile              |
| dependance forte a chaines externes | filiere locale progressive             | resilience supply                   |
| cadence chantier rigide             | cadence pilotable par moules           | planning plus gouvernable           |

## 18. Montage institutionnel et financement - role des ONG

Un portage ONG peut faciliter l'accès opérationnel (concertation locale, ancrage social, acceptabilité) mais ne remplace jamais les autorisations légales obligatoires.

Le montage le plus robuste est tripartite: autorité locale (légale), ONG (gouvernance terrain), partenaire technique (exécution et métrologie), avec un bailleur pour la phase pilote.

La bonne pratique porteur de projet est d'adosser le financement à des jalons go/no-go mesures: lancement, preuve de production, stabilité, extension réseau.

Pour un financeur, la lecture correcte est celle d'un pré-investissement borne: le projet peut soutenir un pilote instrumenté, mais ne doit pas encore être présenté comme déploiement massif dérisoire.

Le dossier doit donc montrer l'usage des fonds, la logique de décaissement par tranches, les sensibilités majeures (coût, délai, production utile) et les conditions d'arrêt si le pilote rate ses seuils.

- ONG = accélération sociale et institutionnelle probable, pas dispense de permis.
- Bailleurs = préfèrent souvent pilotage par résultats et indicateurs vérifiables.
- Collectivité = sécurise foncier, procédures et exploitation de long terme.
- Industriel/agro = apporte exécution et maintenance, sous cadre public clair.
- Lecture financeur honnête: bancable pour un pilote borne, pas encore pour une dette d'expansion standard sans historique de mesures.
- Stop-loss recommande: geler l'extension si coût complet, stabilité ou production utile sortent de la fenêtre fixée au lancement.

**Tableau H - Montage recommandé par profil financeur**

| Portage          | Source de financement       | Avantage               | Risque à couvrir          |
|------------------|-----------------------------|------------------------|---------------------------|
| Particulier      | fonds propres + microcrédit | décision rapide        | fragilité cash            |
| Mairie           | budget public + subventions | ancrage légal          | délai d'instruction       |
| Entreprise       | CAPEX privé + dette         | exécution rapide       | acceptabilité locale      |
| ONG+collectivité | bailleurs adaptation/eau    | accès terrain facilité | gouvernance multi-acteurs |

**Tableau H bis - Jalons financiers go/no-go**

| Jalon       | Preuve attendue                 | Décision                |
|-------------|---------------------------------|-------------------------|
| J0-J3 mois  | autorisation + site + protocole | lancer chantier pilote  |
| J3-J9 mois  | production mesurée stable       | autoriser phase 2       |
| J9-J18 mois | coût réel valide                | extension réseau locale |
| J18+        | co-bénéfices vérifiés           | déploiement multi-sites |

**Tableau H ter - Lecture financeur minimale**

| Bloc             | Ce que le financeur doit voir                      | Décision attendue              |
|------------------|----------------------------------------------------|--------------------------------|
| Usage des fonds  | autorisations, instrumentation, chantier, contrôle | valider ou refuser le pilote   |
| Scénario prudent | coût haut, délai long, production basse            | tester la robustesse du projet |
| Décaissement     | tranches liées à preuves et jalons                 | limiter l'exposition initiale  |
| Stop-loss        | seuils d'arrêt pré-enregistrés                     | sortie ordonnée si échec       |



**Tableau H quater - Sensibilites majeures pilote**

| Variable                 | Effet si derive           | Parade recommandee                      |
|--------------------------|---------------------------|-----------------------------------------|
| delai autorisations      | glissement calendrier     | tranche 1 reservee aux prealables       |
| cout chantier            | hausse CAPEX pilote       | devis borne + marges                    |
| production utile         | retard go/no-go extension | instrumentation continue + revue tierce |
| stabilite operationnelle | surcout maintenance       | protocole simple et site test borne     |

## 19. Cinq cas complets de faisabilite multi-territoires

Cette section fournit des demonstrations croisees de possibilite: de l'etude initiale a la production, puis aux retombees geologiques, hydrauliques, sociales, economiques et politiques.

Les cinq cas ci-dessous sont des cas de cadrage porteur de projet. Ils n'ont pas valeur de promesse contractuelle tant que les autorisations locales et les mesures pilotes ne sont pas validees.

- Cas A: foyer individuel mediterraneen (eau annuelle + citerne etc).
- Cas B: commune rurale marocaine (eau village + horticulture + elevage).
- Cas C: exploitation agro au Mexique/US sud (continuite irrigation).
- Cas D: village pilote Ethiopie (eau humaine + animale + cultures vivrieres).
- Cas E: reseau sahelien Mali/Soudan (logique multi-tours et effets en cascade).

**Tableau I - 5 cas complets (cadrage porteur de projet)**

| Cas                  | Acteur pilote           | Configuration     | Delai             | Resultat immediat attendu     |
|----------------------|-------------------------|-------------------|-------------------|-------------------------------|
| A Europe med.        | particulier             | 1 tour 8 m        | 4-9 mois          | securite eau domestique       |
| B Maroc rural        | mairie                  | 2-4 tours 20 m    | 6-14 mois         | socle eau village             |
| C Mex/US agro        | entreprise              | 6-12 tours 8/20 m | 8-16 mois         | irrigation securisee          |
| D Ethiopie village   | ONG+collectivite        | 4-8 tours 8 m     | 6-12 mois         | eau humains/animaux           |
| E Mali/Soudan reseau | programme multi-acteurs | grappes de tours  | 12-24 mois pilote | stabilisation hydrique locale |

**Tableau I bis - Retombees systemiques par cas**

| Cas | Geologique/hydraulique             | Social                  | Economique             | Politique                       |
|-----|------------------------------------|-------------------------|------------------------|---------------------------------|
| A   | stockage local et usage saisonnier | autonomie familiale     | reduction achat eau    | acceptation citoyenne           |
| B   | humidification locale progressive  | eau de proximite        | activites agricoles    | gouvernance communale           |
| C   | resilience irrigation              | emploi local            | stabilite revenus      | strategie entreprise-territoire |
| D   | securite hydrique de base          | sante/ecole             | micro-economie village | cohesion locale                 |
| E   | corridors hydriques                | baisse stress migration | filiere regionale      | cooperation territoriale        |

## 20. Effets en cascade d'un reseau de tours - Mali, Soudan, Ethiopie

Un reseau de tours change d'echelle: on passe d'un objet hydraulique ponctuel a une dynamique territoriale (eau, vegetation, usages, stabilite sociale).

L'effet en cascade repose sur trois boucles: eau produite -> vegetation -> humidification locale -> meilleure production relative ; puis extension par grappes vers les zones adjacentes.

Les trois geographies cibles (Mali, Soudan, Ethiopie) exigent une execution differenciee selon climat, sols, securite et gouvernance locale.

- Boucle 1 immediate: eau utile pour boisson, hygiene, elevage et cultures de proximite.
- Boucle 2 moyen terme: baisse stress thermique local et stabilisation des usages agricoles.
- Boucle 3 long terme: reseau territorial, reduction vulnerabilite et capacite locale de planification.

- Condition de réussite: métrologie publique, gouvernance locale, maintenance et règles de partage de l'eau.

**Tableau J - Modèle de cascade réseau (Mali/Soudan/Ethiopie)**

| Horizon    | Indicateur hydraulique       | Indicateur social           | Décision réseau  |
|------------|------------------------------|-----------------------------|------------------|
| 0-12 mois  | L/j et disponibilité         | usages critiques couverts   | stabiliser noyau |
| 12-36 mois | surface irriguée utile       | activités locales relancées | étendre grappes  |
| 3-10 ans   | humidité locale + végétation | vulnérabilité réduite       | plan territorial |

# PARTIE II - TECHNIQUE APPLIQUÉE (INGÉNIERIE ET SCIENCES)

## 0. Objet scientifique et perimetre d'expertise

Le perimetre couvre la modelisation de la tour (aeraulique, thermique, psychrometrie, condensation) et de l'outil D-R-M (disrupteur/recombinant moleculaire, phases 01/02/03).

Le dossier ne presume pas l'adhesion: il fournit les equations, les parametres et les conditions de validation pour permettre une revue contradictoire technique.

- Niveau attendu: verification d'equations, controle dimensionnel des unites, et critique des hypotheses de calibration.
- Ordre de lecture: tour (I) puis outil (II), avec cas chiffrés et verrous de reproductibilite.
- Critere de recevabilite: un resultat doit etre fiable a une chaine entree -> calcul -> mesure -> seuil.

## I. LA TOUR - modele complet de fonctionnement

Ce chapitre rassemble toutes les formules de la tour dans l'ordre de calcul reel, de l'entree climatique a la production d'eau.

Le modele est thermo-aeraulique couple avec correction de collecte et controle des regimes transitoires.

- Variables d'entree minimales: H, T<sub>air</sub>, RH, V<sub>vent</sub>, altitude, e<sub>paroi</sub>, type 2-flux/4-flux.
- Constantes de calcul: rho<sub>air</sub>=1,2 kg/m<sup>3</sup> ; g=9,81 m/s<sup>2</sup> ; k<sub>paroi</sub>=2,5 W/mK ; rho<sub>paroi</sub>=2600 kg/m<sup>3</sup> ; Cp<sub>paroi</sub>=790 J/kgK.
- Sorties minimales: Di, sections, V<sub>circ</sub>, DeltaP, Q<sub>air</sub>, m<sub>eau</sub>, L/h, L/j, h productives.
- Controle dynamique: pas de calcul 10 s a 1 min, puis agregation horaire/journaliere.

### I-1. Entrees, hypotheses et notations

Le calcul commence par les variables mesurables de site; aucune valeur deduite ne doit etre injectee sans trace.

Les unites et notations ci-dessous sont imposees pour eviter les erreurs de conversion et faciliter la revue tierce.

- Temperature: T en deg C et T<sub>abs</sub> = T + 273,15 en K.
- Humidite relative: RH en % (0-100).
- Vitesse vent: V<sub>vent</sub> en m/s.
- Hauteur tour: H en m (plage de modele 3 a 110 m).
- Epaisseur corps: e<sub>paroi</sub> en m (ordre de grandeur 0,30 a 1,20 m selon climat).
- Condition de stabilite locale des couloirs: V > 0,05 m/s.

### I-2. Geometrie derivee (diametres et sections)

La geometrie n'est pas libre: elle est derivee de H pour conserver les sections utiles et la stabilite des vitesses.

Les rapports geometriques ci-dessous sont ceux utilises dans le modele de simulation.

- Diametre principal:  $D_i = 2,8 \times \sqrt{H/8}$  [m].
- Exemples: H=8 m -> Di=2,80 m ; H=20 m -> Di=4,43 m ; H=50 m -> Di=7,00 m ; H=110 m -> Di=10,4 m.
- Noyau: D<sub>noyau</sub> = 0,218 x Di.
- Architecture 2-flux: D<sub>int</sub> = 0,565 x Di ; Se<sub>B</sub> = 0,40 x Se<sub>A</sub>.
- Architecture 4-flux: D1=0,849xDi ; D2=0,780xDi ; D3=0,573xDi ; Se<sub>A</sub>=Se<sub>C</sub>=Se<sub>D</sub> ; Se<sub>B</sub>=0,40xSe<sub>A</sub>.
- Continuite imposee: V<sub>B</sub>=V<sub>A</sub> et V<sub>D</sub>=V<sub>C</sub> sur les canaux condenseurs.
- Exemple domestique H=4 m: Di~1,98 m ; D<sub>noyau</sub>~0,43 m ; D<sub>int</sub>~1,12 m ; en 4-flux D1~1,68 m ; D2~1,54 m ; D3~1,13 m.

- Exemple grande production H=110 m: Di~10,4 m ; D\_noyau~2,27 m ; D\_int~5,88 m ; en 4-flux D1~8,83 m ; D2~8,11 m ; D3~5,96 m.

**Tableau G1 - Geometrie comparee (domestique vs haute production)**

| Parametre         | Tour 4 m       | Tour 110 m     | Formule                       |
|-------------------|----------------|----------------|-------------------------------|
| Di                | ~1,98 m        | ~10,4 m        | $Di = 2,8 \times \sqrt{H/8}$  |
| D_noyau           | ~0,43 m        | ~2,27 m        | $D_{noyau} = 0,218 \times Di$ |
| D_int (2-flux)    | ~1,12 m        | ~5,88 m        | $D_{int} = 0,565 \times Di$   |
| D1/D2/D3 (4-flux) | 1,68/1,54/1,13 | 8,83/8,11/5,96 | ratios 0,849/0,780/0,573      |

### I-3. Thermique, refroidissement et psychrometrie

Cette etape determine si l'air peut franchir le point de rosee au coeur de la tour.

La condensation n'est validee que si le gradient thermique et l'humidite absolue conduisent a un Delta w positif.

- Refroidissement canal:  $DT_{canal} = DT_{paroi} \times ep_{sol} \times f_{sol} + DT_{tirage} \times 1,38 \times f_{tir}$ .
- Attenuation thermique par masse:  $ep_{sol} = \exp(-e_{paroi}/1,2)$ .
- Plages  $DT_{paroi}$  par humidite: HR<25% -> 6,0 ; HR<40% -> 5,5 ; HR<60% -> 4,5 ; sinon 3,5.
- Point de rosee:  $T_{rosee}$  via inversion de Magnus (parametres locaux recales).
- Humidite specifique de saturation:  $w_{sat}(T)$  ; humidite specifique d'etat:  $w(T,RH)$ .
- Condition condensation:  $\Delta w = w_{in} - w_{sat\_noyau} > 0$ .

### I-3 bis. Effets des puits (modificateurs climato-sols)

L'anneau est un element structurel standard de la tour et non une option de configuration. Les options scientifiques et decisionnelles portent sur les puits, choisis selon climat local, etat des sols et budget.

Cette section harmonise la lecture porteur de projet/scientifique: sans puits la tour peut produire, mais avec capacites moindres en climat sec; avec puits la fenetre de condensation s'elargit et la production peut monter durablement.

- Base (tour standard):  $w_{eff} = w_{ext}$  ; le coeur condense si  $T_{noyau}$  atteint localement la condition de rosee.
- Avec puits internes:  $w_{eff} = (1 - f_p) \times w_{ext} + f_p \times w_{puits}$ .
- Avec puits artesiens/profonds:  $w_{eff}$  augmente et  $T_{noyau\_eff}$  peut baisser (modele de melange thermique).
- Condition condensation:  $\Delta w = \max(0, w_{eff} - w_{sat}(T_{noyau\_eff}))$ .
- Choix de puits intrinsiquement lie au couple climat + etat des sols + budget utilisateur.
- Lecture physique: les puits ne remplacent pas la tour; ils augmentent son rendement et soutiennent une production plus elevee quand le site est contraint.

**Tableau T1 - Configurations scientifiques (puits uniquement)**

| Configuration                     | Variable modifiee             | Modele                                     | Impact                         |
|-----------------------------------|-------------------------------|--------------------------------------------|--------------------------------|
| Tour standard (anneau inclus)     | $w_{eff}$                     | $w_{eff} = w_{ext}$                        | production de base             |
| Tour + puits internes             | $w_{eff}$                     | $w_{eff} = (1-f_p)w_{ext} + f_p w_{puits}$ | hausse humidite effective      |
| Tour + puits artesiens            | $w_{eff}$ et $T_{noyau\_eff}$ | $w_{eff} + T_{noyau\_eff}$                 | humidite + refroidissement     |
| Tour + puits internes + artesiens | $w_{eff}$ et $T_{noyau\_eff}$ | combinaison des deux                       | performance robuste climat sec |

**Tableau T1 bis - Regle de choix puits selon site**

| Contexte                  | Option puits                  | Justification scientifique            | Decision               |
|---------------------------|-------------------------------|---------------------------------------|------------------------|
| air humide/sol favorable  | sans puits ou internes legers | Delta_w deja positif                  | pilote standard        |
| semi-aride/sol heterogene | puits internes                | hausser w_eff pour stabiliser Delta_w | pilote renforce        |
| aride/sol profond         | puits artesiens               | w_eff + refroidissement coeur         | priorite performance   |
| aride severe              | internes + artesiens          | maximiser fenetre de rosee            | option budget renforce |

## I-4. Aeraulique: accelerations, pressions et debits

Le debit combine effet Venturi et tirage thermique gravitaire. Les deux termes doivent etre traces separement.

Les equations ci-dessous constituent la chaine de calcul principale de la tour.

- Canal A (Venturi fort):  $V_{\text{circ\_A}} = \sqrt{(1,6 \times V_{\text{vent}})^2 + 2 \times g \times H \times \Delta T / T_{\text{abs}}}$ .
- Canal C (Venturi fort):  $V_{\text{circ\_C}} = \sqrt{(1,4 \times V_{\text{vent}})^2 + 2 \times g \times H \times \Delta T / T_{\text{abs}}}$ .
- Canaux B/D (Venturi faibles):  $V_{\text{down}} = \sqrt{(1,2 \times V_{\text{vent}})^2 + 2 \times g \times H \times \Delta T / T_{\text{abs}}}$ .
- Pression tirage:  $\Delta P_{\text{tirage}} = \rho \times g \times H \times \Delta T / T_{\text{abs}}$ .
- Pression vent:  $P_{\text{vent}} = 0,5 \times \rho \times V_{\text{vent}}^2$ .
- Pression dynamique canal:  $P_{\text{canal}} = 0,5 \times \rho \times V_{\text{circ}}^2$ .
- Debit 2-flux:  $Q_{\text{B}} = 0,40 \times Se_{\text{A}} \times V_{\text{circ\_A}}$  ;  $Q_{\text{h}} = Q \times 3600$ .
- Debit 4-flux:  $Q_{\text{B}} = 0,40 \times Se_{\text{A}} \times V_{\text{circ\_A}}$  ;  $Q_{\text{D}} = Se_{\text{D}} \times V_{\text{circ\_C}}$ .
- Equation de controle globale:  $Q_{\text{air}} \approx C_{\text{d}} \times A \times \sqrt{2 \times \Delta P / \rho_{\text{air}}}$ .

## I-5. Condensation, collecte et production d'eau

La production n'est pas une sortie unique: elle est le produit d'un bilan massique corrige par l'efficacite de conception.

Les coefficients de design representent les gains physiques du deflecteur, des ailettes et des geometries de collecte.

- Debit massique air:  $m_{\text{air}} = \rho_{\text{air}} \times Q_{\text{air}}$ .
- Production instantanee:  $m_{\text{eau}} = m_{\text{air}} \times \Delta w \times c_{\text{deflecteur}} \times c_{\text{ailettes}} \times c_{\text{trou}}$ .
- Coefficients de conception:  $c_{\text{deflecteur}}=1,12$  ;  $c_{\text{ailettes}}=1,50$  ;  $c_{\text{trou}}=1,32$  ; produit=2,22.
- Rendement global:  $\eta_{\text{cond}} = \eta_{\text{thermique}} \times \eta_{\text{surface}} \times \eta_{\text{collecte}} \times (1 - \text{pertes}_{\text{reevap}})$ .
- Production reelle:  $m_{\text{eau\_reelle}} = \eta_{\text{cond}} \times m_{\text{air}} \times (w_{\text{in}} - w_{\text{out}})$ .
- Indicateurs obligatoires: L/h instantane, L/j, L/h pic, heures productives, dispersion journaliere.

## I-6. Faisabilite, reproductibilite et seuils scientifiques (tour)

La faisabilite est acceptee seulement si les performances sont obtenues de maniere stable sur plusieurs fenetres climatiques.

La reproductibilite est jugee inter-sites, inter-saisons et inter-equipes avec protocole identique.

- Instrumentation minimale:  $T_{\text{air\_in/out}}$ ,  $RH_{\text{in/out}}$ ,  $T_{\text{surface}}$ ,  $Q_{\text{air}}$ ,  $\Delta P$ , debit condensat, energie.
- Frequences de mesure: 10 s a 1 min; agregation horaire/journaliere.
- Precisions cibles:  $T \pm 0,3 \text{ C}$  ;  $RH \pm 2 \%$  ;  $Q_{\text{air}}$  et  $\Delta P \pm 5 \%$  ; debit condensat  $\pm 2 \%$ .
- Seuil go/no-go tour: production stable sur fenetre glissante et ecart borne entre modele et mesure.
- Journal d'essais obligatoire: horodatage ISO, version protocole, incidents, corrections.

## I-7. Cas probabilistes et visualisation scientifique (tour)

Une formule seule ne suffit pas; ce chapitre transforme les equations en tableaux de lecture scientifique directe.

Les visualisations ci-dessous permettent de classer rapidement un site en probabilite forte/moyenne/faible puis de choisir la configuration puits adaptee.

- Cas favorable: RH nocturne haute, vent modere, bonne amplitude jour/nuit,  $T_{\text{noyau}} < T_{\text{rosee}}$  sur plusieurs heures ->  $\Delta_w$  positif durable -> forte probabilite de production exploitable.
- Cas desertique:  $T_{\text{moy}}=40$  C,  $HR=15$  % ; la nuit  $T\sim 27,5$  C et  $HR_{\text{nuit}}\sim 29$  % -> la condensation naturelle existe, mais reste contrainte par la faiblesse de  $w_{\text{ext}}$ .
- Cas Sahel sec: si  $w < 3$  g/kg sans puits ->  $\Delta_w \sim 0$ , production faible; avec 12 puits,  $w_{\text{eff}} \sim 11$  g/kg ->  $\Delta_w \sim 4$  g/kg, scenario scientifiquement defendable pour pilote.
- Cas tropical humide:  $w_{\text{ext}} \sim 20$  g/kg,  $w_{\text{sat}}(15\text{ C}) \sim 11$  g/kg ->  $\Delta_w \sim 9$  g/kg ; probabilite haute de production utile si la stabilite aeraulique et la collecte sont maintenues.
- Conventions de lecture des cas: besoin famille 4 personnes =  $4 \times 50 = 200$  L/j ; surface irrigable d'ete  $S_{\text{ete}} \sim L_j/3$  [m2] en goutte-a-goutte.
- Cas Sud France type Montpellier (modele climat:  $T=20$  C ;  $HR=62$  % ; vent=4 m/s) :  $H=4$  m ->  $\sim 560$  L/j ;  $S_{\text{ete}} \sim 187$  m2 ; couverture famille  $C_{\text{fam}}=560/200 \sim 2,8$ .
- Cas Sud France type Montpellier :  $H=8$  m ->  $\sim 1372$  L/j ;  $S_{\text{ete}} \sim 457$  m2 ;  $C_{\text{fam}}=1372/200 \sim 6,9$ .
- Cas Sud France type Montpellier :  $H=20$  m ->  $\sim 5219$  L/j ;  $S_{\text{ete}} \sim 1740$  m2 ;  $C_{\text{fam}}=5219/200 \sim 26,1$ .
- Cas Mali type Bamako/Sahel ( $T=34$  C ;  $HR=30$  % ; vent=4,5 m/s) :  $H=20$  m ->  $\sim 45438$  L/j ;  $S_{\text{ete}} \sim 15146$  m2 ;  $C_{\text{fam}} \sim 227$ .
- Cas Ethiopie orientale type Dire Dawa ( $T=35$  C ;  $HR=22$  % ; vent=5 m/s) :  $H=20$  m ->  $\sim 68335$  L/j ;  $S_{\text{ete}} \sim 22778$  m2 ;  $C_{\text{fam}} \sim 341$ .
- Ces chiffres proviennent du chainage du modele actuel: climat -> geometrie optimisee -> production\_totale 2-flux sans bonus oasis de long terme.
- Conclusion de lecture: un site n'est pas juge sur une valeur moyenne unique, mais sur la probabilite de maintenir un  $\Delta_w$  positif pendant une fenetre horaire utile.

**Tableau I-7A - Grille probabiliste scientifique**

| Classe  | Signaux observes                    | Lecture physique                                | Action                   |
|---------|-------------------------------------|-------------------------------------------------|--------------------------|
| Forte   | $\Delta_w$ positif plusieurs heures | rosee maintenue                                 | validation pilote rapide |
| Moyenne | $\Delta_w$ intermittent             | fenetre partielle                               | instrumentation dense    |
| Faible  | $\Delta_w$ proche de 0              | humidite limitee ou refroidissement insuffisant | activer option puits     |

**Tableau I-7B - Cas climatiques compares (visualisation)**

| Cas                  | Climat entree                 | Configuration | $\Delta_w$    | Probabilite     |
|----------------------|-------------------------------|---------------|---------------|-----------------|
| Sud France 4 m       | T20/RH62/vent4                | tour standard | positive      | moyenne a forte |
| Sud France 8 m       | T20/RH62/vent4                | tour standard | positive      | forte           |
| Sud France 20 m      | T20/RH62/vent4                | tour standard | positive      | forte           |
| Sahel sec sans puits | $w < 3$ g/kg                  | tour standard | $\sim 0$      | faible          |
| Sahel sec avec puits | $w_{\text{eff}} \sim 11$ g/kg | tour + puits  | $\sim 4$ g/kg | moyenne a forte |
| Tropical humide      | $w_{\text{ext}} \sim 20$ g/kg | tour standard | $\sim 9$ g/kg | forte           |

**Tableau I-7C - Production et equivalents terrain**

| Site/hauteur     | Production L/j | Familles (200 L/j) | Irrigation etc (m2) |
|------------------|----------------|--------------------|---------------------|
| Montpellier 4 m  | ~560           | ~2,8               | ~187                |
| Montpellier 8 m  | ~1372          | ~6,9               | ~457                |
| Montpellier 20 m | ~5219          | ~26,1              | ~1740               |
| Bamako 20 m      | ~45438         | ~227               | ~15146              |
| Dire Dawa 20 m   | ~68335         | ~341               | ~22778              |

## II. L'OUTIL D-R-M - modele complet de fabrication

Ce chapitre decrit l'outil en trois phases inseparables: deconstruction (phase 01), solidification (phase 02), vitrification (phase 03).

L'objectif scientifique est de montrer la chaine theorique complete, la faisabilite terrain et la reproductibilite industrielle.

- Phase 01 (laser a impulsions): produire une granulometrie controlee avec debit stable.
- Phase 02 (recombinaison/solidification): atteindre le seuil d'empilement dans le temps cible sans chimie additionnelle.
- Phase 03 (vitrification): creer une couche vitreuse durable (Mohs 6,5-7) en temps compatible chantier.
- Validation finale: performances techniques + securite + viabilite economique.

### II-1. Phase 01 - Deconstruction laser a impulsions: equations et rendement

Le modele de phase 01 relie puissance laser impulsionnelle, rendement de transfert et energie specifique de fragmentation.

Le calcul explicite la chaine energetique complete de l'impulsion jusqu'au debit massique.

- Equation coeur:  $P_{eff} = \eta \times P_{laser}$ .
- Debit volumique:  $Q_v = P_{eff} / E_f$ .
- Debit massique:  $m_{dot} = Q_v \times \rho_{granite}$ .
- Hypothese nominale:  $\eta=0,15$  ;  $E_f \sim 8 \text{ J/cm}^3$  ;  $\rho_{granite}=2,65 \text{ kg/L}$ .
- Energie par impulsion:  $E_{pulse} = P_{moy} / PRF$ .
- Puissance de crete impulsion:  $P_{peak} = E_{pulse} / \tau_{pulse}$ .
- Fluence impulsion:  $F = E_{pulse} / A_{spot}$ .
- Condition d'ablation utile:  $F \geq F_{seuil(mat)}$ .
- 3 kW:  $P_{eff}=450 \text{ W}$  ;  $Q_v \sim 202 \text{ L/h}$  ;  $m_{dot} \sim 535 \text{ kg/h}$ .
- 6 kW:  $P_{eff}=900 \text{ W}$  ;  $Q_v \sim 405 \text{ L/h}$  ;  $m_{dot} \sim 1070 \text{ kg/h}$ .
- Granulometrie cible: 100-200  $\mu\text{m}$  (pilotage par frequence d'impulsion).
- Materiel principal: source fibre impulsionnelle, tete optique, module vibro-acoustique, capteurs vibro/thermiques.

### II-1 bis. Harmoniques et synchronisation du laser impulsionnel

La synchronisation n'est pas implicite: elle est pilotee par estimation spectrale puis optimisation contrainte.

Le but est d'aligner la frequence de repetition des impulsions sur les bandes de reponse du materiau pour maximiser le couplage utile.

Le reglage n'est pas uniquement une question de puissance moyenne: les amplitudes vibratoires et leur evolution temporelle pilotent aussi le rendement de resonance et l'efficacite de l'impulsion laser.

- Signal mesure:  $s(t)$  (vibration/retour acoustique), spectre  $S(f)=FFT[s(t)]$ .
- Frequences candidates:  $f_k = k \times f_0$  (harmoniques du mode dominant  $f_0$ ).

- Score harmonique:  $\text{Score}(f) = \sum_k w_k \times |S(kf)|$ .
- Frequence optimale:  $f_{\text{rep}}^* = \text{argmax}_f \text{Score}(f)$  sous contraintes thermiques et securite.
- Reglage de base manuel possible en phase de calibration pour detecter les pics structurels; en exploitation, verrouillage automatique autour des pics detectes.
- Condition de verrouillage:  $|f_{\text{rep}} - f_k| \leq \epsilon_{\text{f}}$ .
- Synchronisation phase: minimiser l'erreur  $\phi_e$  entre impulsion et phase de vibration utile.
- Commande amplitude:  $A_{\text{vib}}(t)$  ajuste automatiquement pour maintenir la reponse cible sans surchauffe locale.
- Couplage effectif:  $\eta_{\text{cpl}} = \eta_0 \times G_f \times G_{\phi}$  ;  $m_{\text{dot}} \sim \eta_{\text{cpl}} \times P_{\text{laser}} / E_f$ .
- Materiel de pilotage: capteurs vibro, acquisition rapide, FFT/STFT temps reel, controleur PRF/energie impulsion.

**Tableau L1 - Equations de synchronisation impulsionnelle**

| Objet             | Equation                                           | Sortie               |
|-------------------|----------------------------------------------------|----------------------|
| Spectre           | $S(f)=\text{FFT}[s(t)]$                            | bandes harmoniques   |
| Score             | $\text{Score}(f)=\sum_k w_k \times  S(kf) $        | qualite couplage     |
| Frequence cible   | $f_{\text{rep}}^*=\text{argmax}_f \text{Score}(f)$ | PRF optimal          |
| Energie impulsion | $E_{\text{pulse}}=P_{\text{moy}}/\text{PRF}$       | energie par tir      |
| Fluence           | $F=E_{\text{pulse}}/A_{\text{spot}}$               | condition d'ablation |

**Tableau L1 bis - Frequences de base et logique de reglage D-R-M**

| Mineral   | Plage de resonance de base     | Reglage recherche                | Mode de pilotage             |
|-----------|--------------------------------|----------------------------------|------------------------------|
| Quartz    | kHz a MHz (selon taille grain) | aligner harmoniques utiles       | manuel calibration puis auto |
| Feldspath | basses a moyennes kHz          | maximiser pics structurels       | manuel calibration puis auto |
| Mica      | basses frequences              | deverrouiller interfaces faibles | manuel calibration puis auto |

**Tableau L1 ter - Amplitude vs puissance (phase 01)**

| Parametre            | Role                | Reglage             | Effet                |
|----------------------|---------------------|---------------------|----------------------|
| Puissance moyenne    | budget energetique  | borne securite      | debit global         |
| Amplitude vibratoire | intensite resonance | auto-adaptatif      | couplage interfaces  |
| PRF impulsion        | cadence tirs        | verrouille sur pics | efficacite ablation  |
| Phase                | timing onde/tir     | correction continue | rendement harmonique |

## II-2. Phase 02 - Solidification: cinetique, leviers et seuil d'empilement

La phase 02 est le goulet d'etranglement principal de cadence. Le critere cle est le delai avant empilement sur resistance coeur.

Le modele compare un scenario de base et un scenario optimise avec leviers physiques explicites.

Contrairement a la phase 01, on opere ici en amplitudes plus basses et en vibrations structurelles pour densifier la matiere, creer une surchauffe controlee puis un refroidissement progressif avant passage au bloc suivant.

- Bloc de reference: 100 kg ; volume  $\sim 52$  L ; densite  $\sim 1,92$  kg/L.
- Loi cinetique de conversion:  $d\alpha/dt = k(T) \times (1-\alpha)^n$ .
- Loi d'Arrhenius:  $k(T)=k_0 \times \exp(-E_a/(R \times T))$ .
- Evolution resistance simplifiee:  $\sigma_{\text{coeur}}(t)=\sigma_{\text{inf}} \times (1-\exp(-t/\tau_{\sigma}))$ .
- Base resonance seule: 2 h ( $\sim 120$  MPa surface,  $\sim 15$  MPa coeur), 4 h ( $\sim 180/\sim 35$ ), 6 h ( $\sim 200/\sim 55$ ).
- Reference longue: 24 h ( $\sim 230/\sim 90$ ) ; 28 j ( $\sim 250/\sim 110$ ).



- Leviers physiques: eau 40-60 C ; sable 100-200 um ; double resonance ; pression des blocs superieurs ; canaux d'evacuation.
- Definition de lecture: empilement conditionnel = pose possible sous surveillance stricte ; empilement nominal = pose standard ; empilement robuste = marge de securite operationnelle.
- Scenario optimise combine (correle au schema chantier du site): appui chantier possible vers ~1,5-2,0 h (surface ~150-180 MPa), seuil nominal vise ~2,0-2,5 h (surface ~195-210 MPa ; coeur ~52-62 MPa).
- A 4 h optimise: surface ~240 MPa ; coeur ~95 MPa ; a 7 j: surface ~250 MPa ; coeur ~115 MPa.
- Lecture croisee lexique (MAT-01): la plage 200-250 MPa a 7 j concerne la resistance globale visee du bloc/ouvrage optimise ; la valeur ~115 MPa du tableau L2 bis decrit le coeur interne en phase de cure avancee.
- Gain annonce vs base: -55 a -65 % sur delai avant empilement.
- Ancrage annexe site: voir <https://www.terre-resilience.fr/lexique.php#phase02> (F-05 a F-10) et #hypotheses pour les bornes 1,5-4 h.
- Consolidation bloc-a-bloc: le D-R-M assure la qualite matiere et l'energie de process, la resonance structurelle assure la consolidation rapide des faces adjacentes.
- Vitrification legere intermediaire: sceller partiellement les faces pour autoriser l'empilement rapide sans perdre la cure du coeur.
- Materiel principal: double transducteur, moule instrumente, pilotage frequence/amplitude, suivi thermique et mecanique.

**Tableau L2 - Bibliotheque de calcul phase 02**

| Niveau     | Equation                                                           | Usage                 |
|------------|--------------------------------------------------------------------|-----------------------|
| Cinetique  | $d\alpha/dt = k(T) \times (1-\alpha)^n$                            | vitesse de conversion |
| Activation | $k(T)=k_0 \times \exp(-E_a/(R \times T))$                          | effet temperature     |
| Resistance | $\sigma_{coeur}(t)=\sigma_{inf} \times (1-\exp(-t/\tau_{\sigma}))$ | seuil empilement      |
| Cadence    | $cadence = N_{moules} / t_{cycle}$                                 | debit blocs/h         |

**Tableau L2 bis - Evolution de durcissement (reference chantier)**

| Temps                          | Surface      | Coeur      | Empilement                  |
|--------------------------------|--------------|------------|-----------------------------|
| 2 h (base)                     | ~120 MPa     | ~15 MPa    | non                         |
| 4 h (base)                     | ~180 MPa     | ~35 MPa    | risque                      |
| 6 h (base)                     | ~200 MPa     | ~55 MPa    | oui minimal                 |
| ~1,5-2,0 h (optimise rotation) | ~150-180 MPa | ~30-40 MPa | appui chantier conditionnel |
| ~2,0-2,5 h (optimise)          | ~195-210 MPa | ~52-62 MPa | oui nominal                 |
| 4 h (optimise)                 | ~240 MPa     | ~95 MPa    | oui robuste                 |
| 7 j (optimise)                 | ~250 MPa     | ~115 MPa   | etat quasi final            |

**Tableau L2 ter - Logique amplitude phase 02**

| Etape          | Amplitude       | Effet thermique            | Objectif                |
|----------------|-----------------|----------------------------|-------------------------|
| induction      | moyenne         | surchauffe controlee       | lancer polycondensation |
| densification  | basse a moyenne | maintien thermique         | compacter sans rupture  |
| transition     | basse           | refroidissement progressif | stabiliser coeur        |
| pre-empilement | faible          | equilibrage                | passage bloc suivant    |

## II-3. Phase 03 - Vitrification: energie surfacique, cadence et durabilite

La phase 03 transforme une bonne resistance mecanique en durabilite longue duree via couche vitreuse.

Le calcul relie energie surfacique, vitesse de balayage, temps par bloc et profondeur de couche.

- Bloc reference: 40x35x35 cm ; surface totale ~8050 cm<sup>2</sup> (~0,80 m<sup>2</sup>).
- Energie surfacique cible: ~5 J/cm<sup>2</sup> pour ~1 mm (ordre de grandeur silicates).
- Energie surfacique appliquee:  $E_{surf} = (\eta_{abs} \times P_{laser}) / (v_{scan} \times b_{spot})$ .
- Temps de passage:  $t_{bloc} = A_{bloc} / (v_{scan} \times b_{eff}) \times n_{passes}$ .
- Profondeur de couche simplifiee:  $e_{vitri} \sim E_{surf} / [\rho \times (C_p \times \Delta T + L_{fusion})]$ .
- 3 kW: couverture ~50 cm<sup>2</sup>/s ; temps bloc ~2-3 min ; couche ~0,8 mm.
- 6 kW: couverture ~100 cm<sup>2</sup>/s ; temps bloc ~1-1,5 min ; couche ~1,5 mm.
- 12 kW: couverture ~320 cm<sup>2</sup>/s ; temps bloc <30 s ; couche ~3 mm.
- Comparatif durete Mohs: beton ~3 ; bloc D-R-M non vitrifie ~5-6 ; granite ~6-6,5 ; bloc D-R-M vitrifie ~6,5-7.
- Objectif de durabilite: comportement millenaire en environnement agressif.
- Materiel principal: tete de balayage, controle vitesse/puissance, instrumentation thermique de surface.

**Tableau L3 - Bibliotheque de calcul phase 03**

| Objet              | Equation                                                                     | Sortie            |
|--------------------|------------------------------------------------------------------------------|-------------------|
| Energie surfacique | $E_{surf} = (\eta_{abs} \times P_{laser}) / (v_{scan} \times b_{spot})$      | J/cm <sup>2</sup> |
| Temps bloc         | $t_{bloc} = A_{bloc} / (v_{scan} \times b_{eff}) \times n_{passes}$          | min/bloc          |
| Profondeur vitree  | $e_{vitri} \sim E_{surf} / [\rho \times (C_p \times \Delta T + L_{fusion})]$ | mm                |

## II-4. Faisabilite, reproductibilite et developpement theorique complet (outil)

La faisabilite de l'outil est acceptee si les trois phases tiennent simultanement: debit phase 01, delai phase 02, qualite phase 03.

Le developpement complet theorique exige une boucle fermee modele -> mesure -> recalage -> validation multi-sites.

- Mesures minimales phase 01:  $P_{laser}$ ,  $P_{eff}$  estimee,  $m_{dot}$ , distribution granulometrique.
- Mesures minimales phase 02: resistances surface/coeur vs temps, temperature melange, energie injectee.
- Mesures minimales phase 03: energie/cm<sup>2</sup>, profondeur vitrifiee, Mohs, permeabilite, cycles durabilite.
- Seuils go/no-go: stabilite 2 h glissantes, ecart modele-mesure borne, dispersion lot-lot controlee.
- Cadre economique de validation: CAPEX 3 kW ~79-166 kEUR ; 6 kW ~112-222 kEUR ; point mort 3 kW ~450-1250 h ; 6 kW ~400-1170 h.
- Prototype de developpement phase 01 portative: somme des sous-systemes prototype ~42,3 a 165 kEUR selon niveau de securisation et d'integration.
- Consommation minimale verifiable:  $E_{min} = P_{laser} \times t$ . Exemple: 3 kW sur 8 h -> 24 kWh ; 6 kW sur 8 h -> 48 kWh ; consommation chantier reelle >  $E_{min}$  car chiller + aspiration + commande.
- Conclusion scientifique attendue: protocole reproductible, performance falsifiable, et trajectoire d'industrialisation defendable.

## II-5. Cadence chantier et exemples de reconstruction

L'expertise scientifique doit aussi montrer la traduction chantier du modele: combien de blocs par heure, quelle surface de mur, quel delai pour une reconstruction reelle.

Les cas ci-dessous convertissent les resultats des trois phases en objets de chantier mesurables.

- Bloc reference: 40x35x35 cm -> volume ~0,049 m<sup>3</sup> -> masse ~100 kg -> face de mur ~0,14 m<sup>2</sup>.
- Debit phase 01: 3 kW -> ~535 kg/h -> ~5,3 blocs/h ; 6 kW -> ~1070 kg/h -> ~10,7 blocs/h.

- Phase 02 optimisee: cycle nominal ~2,5 h (seuil conditionnel possible vers ~2,0 h) ; cadence bloc nominale = nombre de moules / 2,5 h.
- 4 moules -> ~1,6 bloc/h ; 8 moules -> ~3,2 blocs/h ; 12 moules -> ~4,8 blocs/h.
- Surface de mur correspondante: ~0,22 m<sup>2</sup>/h ; ~0,45 m<sup>2</sup>/h ; ~0,67 m<sup>2</sup>/h.
- Mur 2 x 2 x 0,35 m -> ~29 blocs -> ~9 h actives avec 8 moules.
- Mur 5 x 2,5 x 0,35 m -> ~89 blocs -> ~28 h avec 8 moules ; ~19 h avec 12 moules.
- Mur 10 x 3 x 0,35 m -> ~214 blocs -> ~67 h avec 8 moules ; ~45 h avec 12 moules.
- Hypothese tour de calcul: N\_niveaux = ceil(H\_tour/0,35) ; N\_blocs = 8 x N\_niveaux si l'on retient l'exemple site d'un niveau a 8 blocs.
- Masse totale theorique: M\_tour = 100 x N\_blocs [kg] ; temps alimentation phase 01: t\_alim = M\_tour / m\_dot.
- Exemple tour 10 m: N\_niveaux~29 ; N\_blocs~232 ; M\_tour~23,2 t ; t\_alim~43 h en 3 kW ou ~22 h en 6 kW ; t\_montage\_opt~58 a 87 h a raison de 2 a 3 h par niveau.
- Exemple tour 20 m: N\_niveaux~58 ; N\_blocs~464 ; M\_tour~46,4 t ; t\_alim~87 h en 3 kW ou ~43 h en 6 kW ; t\_montage\_opt~116 a 174 h.
- Cout direct machine theorique: C\_direct = t x cout\_horaire\_direct. Donc tour 10 m ~2,4 a 3,9 kEUR en 3 kW ou ~1,8 a 2,9 kEUR en 6 kW pour la seule alimentation matiere; tour 20 m ~4,8 a 7,8 kEUR en 3 kW ou ~3,4 a 5,6 kEUR en 6 kW.
- Verrou scientifique: verifier que la phase 01 alimente bien la cadence moules, que la phase 02 tient son seuil d'empilement et que la phase 03 reste compatible avec le tempo chantier.

### III. References techniques et normatives

Les references ci-dessous constituent la base de verification externe du modele.

- ASHRAE Handbook Fundamentals (psychrometrie, humidite, confort hygrothermique).
- Incropera et al., Heat and Mass Transfer (transferts chaleur/masse).
- ISO 15927-1 et guides WMO (donnees climatiques et qualite des series).
- RILEM, ASTM, EN (essais mecaniques et durabilite des materiaux).
- ISO 11553, IEC 60825, ISO 13849 (securite machines et laser).
- Rapports IEA/IRENA (architectures energetiques hybrides terrain).

### IV. Bibliotheque consolidee des formules (tour + outill)

Cette bibliotheque donne une vue compacte des equations principales, des variables et des unites pour audit croise.

Tableau F - Formules de reference

| Bloc            | Formule                                                            | Variables cle     | Unite sortie |
|-----------------|--------------------------------------------------------------------|-------------------|--------------|
| Geometrie       | $D_i = 2,8 \times \sqrt{H/8}$                                      | H                 | m            |
| Aeraulique      | $V_{circ} = \sqrt{(C \times V_{vent})^2 + 2gH \Delta T/T_{abs}}$   | C,V_vent,H,DeltaT | m/s          |
| Pression        | $\Delta P_{tirage} = \rho \ g \ H \ \Delta T/T_{abs}$              | rho,g,H,DeltaT    | Pa           |
| Condensation    | $m_{eau} = m_{air} \ \Delta w \ c_{def} \ c_{ailettes} \ c_{trou}$ | m_air,Delta_w,c_i | kg/s         |
| Laser impulsion | $E_{pulse}=P_{moy}/PRF$ ; $F=E_{pulse}/A_{spot}$                   | P_moy,PRF,A_spot  | J ; J/cm2    |
| Solidification  | $\sigma_{coeur}(t)=\sigma_{inf}(1-\exp(-t/\tau))$                  | sigma_inf,t,tau   | MPa          |
| Vitrification   | $t_{bloc}=A/(v \ b_{eff}) \ n_{passes}$                            | A,v,b_eff,n       | s ou min     |

## ANNEXE FINALE - REFERENCES ET SOURCES ELARGIES

Les références ci-dessous structurent la base documentaire de travail. Elles doivent être versionnées, annotées et reliées aux hypothèses testées dans le pilote.

Cette liste mixe des sources de matériaux, de transfert thermo-hydrique, de sécurité industrielle, de données climatiques et de méthodes d'évaluation expérimentale.

- Davidovits, J. - Geopolymer Chemistry and Applications (travaux de référence, éditions successives).
- RILEM Technical Recommendations - essais de durabilité et comportement matériaux minéraux.
- ASTM C109 / C348 / C642 - résistance, flexion et porosité des matériaux cimentaires/minéraux.
- EN 196 et EN 12390 - méthodes d'essais mécaniques et caractérisation en laboratoire.
- ASHRAE Handbook - Fundamentals (psychrométrie et humidité de l'air).
- Incropera, DeWitt et al. - Fundamentals of Heat and Mass Transfer.
- ISO 15927-1 - données climatiques pour performance thermique des bâtiments.
- WMO Guide to Climatological Practices - collecte et qualité des séries météo.
- ISO 11553 - sécurité des machines utilisant des lasers.
- IEC 60825 - classification et exigences de sécurité laser.
- ISO 13849 - sécurité des machines et parties de systèmes de commande.
- Guides INRS/NIOSH/OMS sur poussières minérales et silice respirable.
- Littérature sur effet cheminée (stack effect) et écoulements en conduits verticaux.
- Publications sur batteries LFP/NMC et performance réelle en climat chaud.
- Rapports publics IEA/IRENA sur hybridation solaire-batteries en zones isolées.

*Une utopie est un rêve immobile ; mais lorsqu'un rêve devient projet, puis réalisation, il se change en œuvre de vie, évidente et visionnaire.*

*Terre de Résilience - Vision de longue durée*