

Dossier Scientifique - Terre de Résilience

Auteur: E. Lespert | Projet: Terre de Résilience | Date: 01/06/2026

Dossier scientifique destine a l'expertise technique: modeles, equations, hypotheses, limites et conditions de verification.

Ce dossier s'adresse a des techniciens et des scientifiques confirmes. Il expose le modele complet de la tour et de l'outil avec les hypotheses explicites, les equations et les limites d'application.

L'objectif est de rendre les resultats discutables et verifiables: un lecteur peut reprendre les entrees, rejouer les calculs, comparer aux mesures et conclure sur la validite du modele.

La finalite est double: etablir la faisabilite physique et cadrer la reproductibilite experimentale avant toute generalisation industrielle.

La trame est organisee en tableaux de modeles, tableaux d'hypotheses, tableaux de projections et bibliotheque de formules.



Note: dessin à compléter avec coupole supérieure et déflecteur sur tour intérieure.

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_{air}, RH, V_{vent}, altitude, e_{paroi}, type 2-flux/4-flux.
- Constantes de calcul: $\rho_{air}=1,2 \text{ kg/m}^3$; $g=9,81 \text{ m/s}^2$; $k_{paroi}=2,5 \text{ W/mK}$; $\rho_{paroi}=2600 \text{ kg/m}^3$; $Cp_{paroi}=790 \text{ J/kgK}$.
- Sorties minimales: Di, sections, V_{circ}, DeltaP, Q_{air}, m_{eau}, 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 $T_{abs} = T + 273,15$ en K.
- Humidite relative: RH en % (0-100).
- Vitesse vent: V_{vent} en m/s.
- Hauteur tour: H en m (plage de modele 3 a 110 m).
- Epaisseur corps: e_{paroi} en m (ordre de grandeur 0,30 a 1,20 m selon climat).
- Condition de stabilite locale des couloirs: $V > 0,05 \text{ m/s}$.

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: $Di = 2,8 \times \sqrt{H/8} \text{ [m]}$.
- Exemples: $H=8 \text{ m} \rightarrow Di=2,80 \text{ m}$; $H=20 \text{ m} \rightarrow Di=4,43 \text{ m}$; $H=50 \text{ m} \rightarrow Di=7,00 \text{ m}$; $H=110 \text{ m} \rightarrow Di=10,4 \text{ m}$.
- Noyau: $D_{noyau} = 0,218 \times Di$.
- Architecture 2-flux: $D_{int} = 0,565 \times Di$; $Se_B = 0,40 \times Se_A$.
- Architecture 4-flux: $D1=0,849 \times Di$; $D2=0,780 \times Di$; $D3=0,573 \times Di$; $Se_A=Se_C=Se_D$; $Se_B=0,40 \times Se_A$.
- Continuite imposee: $V_B=V_A$ et $V_D=V_C$ sur les canaux condenseurs.

- Exemple domestique H=4 m: Di~1,98 m ; D_noyau~0,43 m ; D_int~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. Aeraique: 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: $Q_B = 0,40 \times Se_A \times V_{\text{circ_A}}$; $Q_h = Q \times 3600$.
- Debit 4-flux: $Q_B = 0,40 \times Se_A \times V_{\text{circ_A}}$; $Q_D = Se_D \times V_{\text{circ_C}}$.
- Equation de controle globale: $Q_{\text{air}} \approx C_d \times A \times \sqrt{2 \times \Delta P / \rho_{\text{air}}}$.

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: $\eta_{\text{cond}} = \eta_{\text{thermique}} \times \eta_{\text{surface}} \times \eta_{\text{collecte}} \times (1 - \text{pertes_reevap})$.
- 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_{surface} , Q_{air} , ΔP , 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_{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 -> Δ_w positif durable -> forte probabilite de production exploitable.
- Cas desertique: $T_{\text{moy}}=40$ C, $HR=15$ % ; la nuit $T=27,5$ C et $HR_{\text{nuit}}=29$ % -> la condensation naturelle existe, mais reste contrainte par la faiblesse de w_{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 -> ~ 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 -> ~ 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 -> ~ 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 -> ~ 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 -> ~ 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 Δ_w positif pendant une fenetre horaire utile.

Tableau I-7A - Grille probabiliste scientifique

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

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

Cas	Climat entree	Configuration	Δ_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	~ 0	faible
Sahel sec avec puits	$w_{\text{eff}} \sim 11$ g/kg	tour + puits	~ 4 g/kg	moyenne a forte
Tropical humide	$w_{\text{ext}} \sim 20$ g/kg	tour standard	~ 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: $\eta=0,15$; $E_f=8 \text{ J/cm}^3$; $\rho_{granite}=2,65 \text{ kg/L}$.
- 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 μm (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: $Score(f) = \sum_k w_k \times |S(kf)|$.
- Frequence optimale: $f_{rep}^* = \operatorname{argmax}_f Score(f)$ 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: $|f_{rep} - f_k| \leq \epsilon_f$.
- Synchronisation phase: minimiser l'erreur ϕ_e entre impulsion et phase de vibration utile.
- Commande amplitude: $A_{vib}(t)$ ajuste automatiquement pour maintenir la reponse cible sans surchauffe locale.
- Couplage effectif: $\eta_{cpl} = \eta_0 \times G_f \times G_{\phi}$; $\dot{m} \sim \eta_{cpl} \times P_{laser} / E_f$.
- 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	$S(f)=FFT[s(t)]$	bandes harmoniques
Score	$Score(f)=\sum_k w_k \times S(kf) $	qualite couplage
Frequence cible	$f_{rep}^*=\operatorname{argmax}_f Score(f)$	PRF optimal
Energie impulsion	$E_{pulse}=P_{moy}/PRF$	energie par tir
Fluence	$F=E_{pulse}/A_{spot}$	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 ~52 L ; densite ~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: $\sigma_{coeur}(t)=\sigma_{inf} \times (1-\exp(-t/\tau_{\sigma}))$.

- Base resonance seule: 2 h (~120 MPa surface, ~15 MPa coeur), 4 h (~180/~35), 6 h (~200/~55).
- Reference longue: 24 h (~230/~90) ; 28 j (~250/~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 cm² (~0,80 m²).
- Energie surfacique cible: ~5 J/cm² 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 cm²/s ; temps bloc ~2-3 min ; couche ~0,8 mm.
- 6 kW: couverture ~100 cm²/s ; temps bloc ~1-1,5 min ; couche ~1,5 mm.
- 12 kW: couverture ~320 cm²/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 ²
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/cm², 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 m3 -> masse ~100 kg -> face de mur ~0,14 m2.
- 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 m2/h ; ~0,45 m2/h ; ~0,67 m2/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: $N_{\text{niveaux}} = \text{ceil}(H_{\text{tour}}/0,35)$; $N_{\text{blocs}} = 8 \times N_{\text{niveaux}}$ si l'on retient l'exemple site d'un niveau a 8 blocs.
- Masse totale theorique: $M_{\text{tour}} = 100 \times N_{\text{blocs}}$ [kg] ; temps alimentation phase 01: $t_{\text{alim}} = M_{\text{tour}} / m_{\text{dot}}$.
- Exemple tour 10 m: $N_{\text{niveaux}} \sim 29$; $N_{\text{blocs}} \sim 232$; $M_{\text{tour}} \sim 23,2$ t ; $t_{\text{alim}} \sim 43$ h en 3 kW ou ~22 h en 6 kW ; $t_{\text{montage_opt}} \sim 58$ a 87 h a raison de 2 a 3 h par niveau.
- Exemple tour 20 m: $N_{\text{niveaux}} \sim 58$; $N_{\text{blocs}} \sim 464$; $M_{\text{tour}} \sim 46,4$ t ; $t_{\text{alim}} \sim 87$ h en 3 kW ou ~43 h en 6 kW ; $t_{\text{montage_opt}} \sim 116$ a 174 h.
- Cout direct machine theorique: $C_{\text{direct}} = t \times \text{cout_horaire_direct}$. 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 + outil)

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

