GeneticWing

Planifier le vol à voile d'un drone à voilure fixe : professeur, élève génératif et recherche génétique dans un espace appris

Clément Dumeril

Bilan au 31 octobre 2026

Toutes les valeurs viennent des runs du dépôt (README, cluster Slurm et PC de calcul). Coût : énergie nette dépensée, normalisée par le vol en palier au moteur ; 1 = vol au moteur, < 0 = énergie gagnée sur l'air.

En une page

- **Problème.** Un planeur motorisé (SB-XC, 4,6 m) doit gagner de l'énergie dans les thermiques au lieu de brûler sa batterie. Planifier ces trajectoires coûte cher (optimisation non convexe, contraintes de décrochage).
- **Ce qu'on a construit.** Un simulateur point-masse plat (+ aile par tronçons), un *professeur* hors ligne (loi réactive + NLP), un jeu de 15 080 situations résolues, un *élève génératif* (VAE de commandes + simulateur), une recherche génétique dans son espace latent, une boucle fermée, et un vol longue distance de 20 km.
- **Résultat central.** Le GA dans l'espace appris **bat son propre professeur** : $-5{,}72$ contre $-4{,}88$ (aile par tronçons, 65 situations de test), et la phase 3 sur point-masse donnait $-6{,}06$ contre $-5{,}24$.
- **En vol réel simulé.** En air calme, l'avance tient en boucle fermée ($-5{,}41$ contre $-4{,}69$). **Une erreur de 15 m sur le centre du thermique** fait tout retomber vers -2.
- **Sur 20 km.** Les montées du GA sont **61 % plus rapides** (2,08 contre 1,29 m/s) : +3,3 km/h à batterie égale, ou **la vitesse du moteur avec 13 fois moins de batterie** ; **0 décrochage** grâce à un limiteur d'aile intérieure dans l'autopilote.
- **En temps réel.** Un générateur *distillé* des solutions du GA, puis corrigé par DAgger sur les états du vol, **monte à 2,23 m/s en 0,24 s par plan** : aussi bien que le GA (13 s), et plus vite que le moteur à MacCready 1.

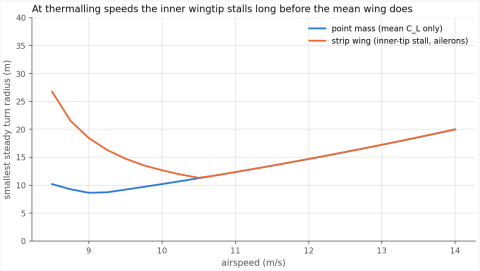
Question de recherche et verdict des hypothèses

Un modèle génératif entraîné à imiter un optimiseur peut-il proposer vite des trajectoires de vol à voile proches de l'optimum, vérifiées par la physique et raffinées par l'optimisation locale ?

Hypothèse	Verdict	Ce qui le montre
H1 Le GA est un bon professeur	**rejetée**, puis **reformulée**	GA sur 87 gènes : le plus faible à budget égal. Dans un espace latent appris : bat le professeur ($-0{,}82$).
H2 Élève temps réel proche de l'optimum	**en partie**	Flow matching : 30–50 ms, 67–90 % résolues, $\approx$40 % du gain. Prior physique : 0,2 s, au niveau du professeur.
H3 Multimodalité (régression échoue)	**tenue**	Régression : 0 % faisable (moyenne des deux sens d'orbite) ; flow matching : les deux sens.
H4 Vérification + raffinement	**en partie**	NLP amorcée par l'élève : 76 % contre 8 % depuis le vol droit.
H5 Robustesse (vent faux, rafales)	**ouverte**	Air calme : tient. Thermique mal placé : perte massive tant que la croyance n'est pas corrigée.
H6 Auto-amélioration	**non soutenue**	Une boucle d'amélioration : $-3{,}59 \rightarrow -3{,}73$, puis plus rien.

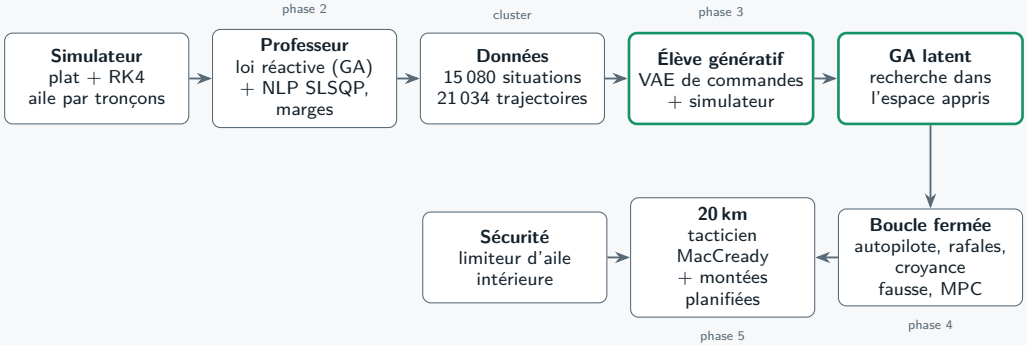
Le modèle physique

- **Avion** : SB-XC, 4,2 kg, 1,07 m², allongement 19,8, polaire parabolique (finesse max 27, $V_{md} = 8{,}05$ m/s), moteur 15 N. C_{D0}, $C_{L,\max}$, Oswald *estimés*.
- **Point-masse en vol coordonné**, vent $W(p, t)$: uniforme + thermique (échelle d'Allen, cœur gaussien de ≈30 m de rayon à 250 m) + turbulence de Dryden.
- **Platitude différentielle** : trajectoire + vent ⇒ vitesse air, C_L, inclinaison, facteur de charge, poussée requise, sans intégration. Toute une population est évaluée d'un coup.
- **Aile par tronçons** (40 bandes) : en virage, l'aile intérieure vole plus lentement, ses sections décrochent avant l'aile moyenne, les ailerons saturent et traînent.
- **Intégration RK4** partout (voir la découverte Euler).



Rayon de virage minimal : 9 m en point-masse à 9 m/s, 18 m avec l'aile par tronçons, ≈11 m au mieux (10,5 m/s).

L'architecture construite



Le professeur coûte ≈35 s par situation ; on l'amortit une fois hors ligne. L'élève propose des plans en 0,2 s (prior) à 13 s (GA, 3 000 évaluations). Chaque plan est vérifié par le simulateur.

Les algorithmes d'optimisation utilisés

Algorithme	Rôle et détails	Où
GA à codage réel	croisement SBX, mutation polynomiale, classement de Deb (faisable d'abord, puis violation), population 50 réglée par balayage	phase 2, GA latent
GA de T. Zohdi	80 % d'immigrants aléatoires par génération ; règle les 10 paramètres de la loi réactive	loi réactive
CMA-ES	stratégie d'évolution à covariance adaptative, référence	phase 2
NLP SLSQP	optimisation locale sous contraintes, gradients par différences finies vectorisées, budget strict, multi-départ	professeur, raffinement
Loi réactive d'orbite	guidage par cap + énergie (rayon, vitesses, centre, plancher) ; 2 graines par sens d'orbite (normale et rapide)	graines du professeur
Contraintes	agrégation KS, marges du professeur (*constraint tightening* : C_L 0,75, inclinaison 38°, charge 2,1, poussée 0,8)	partout
MPC	replanification toutes les 10 s, horizon qui rétrécit jusqu'à la fin du vol, démarrage à chaud	phase 4
Théorie de MacCready	vitesse de transition optimale, choix du thermique au meilleur rythme de progression, sortie sous le réglage	phase 5

Les modèles de machine learning utilisés

Modèle	Ce qu'il apprend	Résultat
Régression MLP (4×512)	contexte → génome, déterministe	**0 %** faisable
Flow matching conditionnel (rectified flow)	distribution des trajectoires du professeur ; 1 ou 8 pas d'échantillonnage	67–90 % résolues, 30–50 ms
VAE conditionnel de positions	compresse les 87 gènes en $d = 8/16/32$ dimensions latentes	GA latent : 100 % résolues, −3,59
VAE de commandes + décodeur physique	sort C_L, inclinaison, poussée en 61 nœuds, bornés par construction ; un simulateur RK4 différentiable (PyTorch) en fait la trajectoire	**faisabilité 20 % → 100 %**
Évolution de variables latentes	le GA cherche dans l'espace latent, chaque individu est décodé et volé (Volz et al. 2018)	**bat le professeur**
Données	contexte dans le repère de cap (invariance par rotation), miroir gauche/droite exact, marges du professeur	

Entraînement : CPU (PC) et GPU A40 (cluster) ; 20 000 pas ; β-VAE avec $\beta = 0{,}1$; décodeur 3×512.

Phase 1 : socle, reproduction du plané de l'ARPL (S0)

Mesure	Vol ARPL	Plan, vent uniforme	Boucle fermée, Dryden (50 tirages)
Vitesse air moyenne (m/s)	12,50	12,50	12,61
Taux de chute moyen (m/s)	1,48	1,58	1,61
Finesse	9,83	11,15	11,27
RMSE vitesse air (m/s)	1,09	0,00	0,87
RMSE netto (m/s)	0,69	0,00	0,71

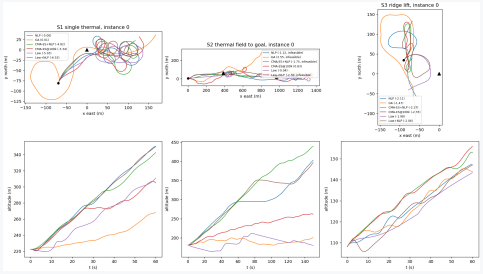
- Les statistiques d'erreur du vol réel de l'ARPL sont retrouvées en boucle fermée ; le planificateur converge depuis 20 départs perturbés sur 20.
- La contrainte $T_{req} = 0$ généralise la contrainte de taux de chute de l'ARPL à un vent non uniforme.

Masse et surface du Stratosurfer : valeurs provisoires ; finesse simulée au-dessus du vol réel (pas de pertes de suivi hors turbulence).

Phase 2 : quel professeur ? (3 scénarios × 3 instances × 11 méthodes)

Méthode (20k éval.)	S1 thermique	S2 vers but	S3 pente
NLP (départ droit)	−2,77	infais.	−2,11
GA réglé (pop. 50)	0,15	infais.	−0,73
GA de Zohdi	infais.	infais.	infais.
CMA-ES + NLP	−3,80	infais.	−2,16
GA @100k	−0,99	0,47	−1,83
Loi réactive	−4,58	−0,02	−1,96
Loi + NLP	−6,04	infais.	−0,03

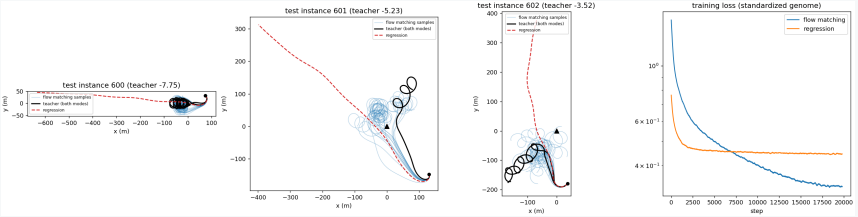
- **H1 rejetée telle quelle** : le GA brut est le plus faible à budget égal (87 à 159 gènes couplés).
- **La structure bat la recherche** : la loi réactive encode l'orbite ; ajustée puis raffinée par la NLP, elle donne le meilleur professeur (+30 % d'énergie sur la loi seule).



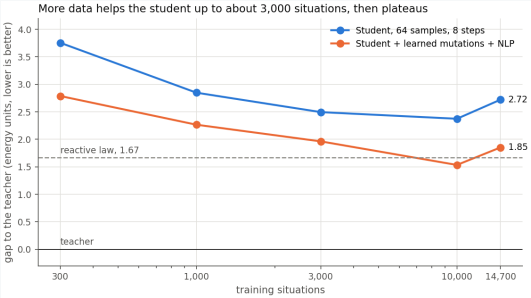
Phase 3a : élève génératif (78 situations nouvelles, professeur $-5{,}19$)

Méthode	Résolues	Coût	Écart	Temps
Régression	**0 %**	–	–	1 ms
Flow matching, 64 tirages, 1 pas	90 %	0,87	6,11	28 ms
Flow matching, 8 pas	67 %	$-2{,}06$	3,11	49 ms
+ mutations + NLP	76 %	$-2{,}51$	2,72	1,0 s
Loi réactive	100 %	$-3{,}53$	1,66	réflexe
NLP depuis vol droit	8 %	1,49	6,95	0,9 s

- **H3** : la régression moyenne l'orbite horaire et anti-horaire en une ligne droite qui sort du thermique.
- **La faisabilité est le goulot** : un professeur résolu pile sur ses contraintes cassait 80 % de ses solutions au moindre bruit ; avec des marges ($-0{,}24$ d'énergie), 8 à 16 fois plus tolérant.



Phase 3b : à l'échelle (cluster, 15 080 situations)

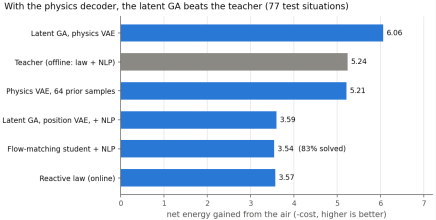


- Le professeur résout 15 080 situations (27 649 solutions) sur 21 nœuds de 32 cœurs.
- **Courbe d'échelle** : plus de données aide jusqu'à $\approx$3 000 situations, puis l'écart plafonne. Au-delà, la limite est le modèle, pas les données.
- H3 tient à toutes les tailles : la régression résout au plus 12 %.
- Sur les 77 situations de test du cluster : professeur $-5{,}24$, loi réactive $-3{,}57$, flow matching + NLP $-3{,}54$.

Phase 3c : GA dans un espace appris (77 situations, professeur $-5{,}24$)

Méthode	Résolues	Coût	Écart
GA sur 87 gènes + NLP	55 %	+1,92	7,09
GA latent (VAE de positions) + NLP	100 %	−3,59	1,64
Commandes du professeur, volées	100 %	−4,70	0,54
64 tirages du prior physique	100 %	−5,21	0,03
GA latent, décodeur physique	100 %	−6,06	−0,82

- L'espace latent **sauve le GA** : 55 % → 100 % résolues.
- Mettre **la physique dans le décodeur** (commandes bornées + simulateur) fait passer l'aller-retour de 20 % à 100 % faisable.
- 64 tirages, sans recherche, **égalent le professeur en 0,2 s**.



Une découverte méthodologique : la recherche exploite l'erreur numérique

- Les premiers simulateurs intégraient en **Euler explicite**. En virage, la portance fait tourner la vitesse, et chaque pas ajoute $(a\,\Delta t)^2$ à son carré : **de l'énergie gratuite**.
- Le GA sur le décodeur physique l'a trouvée et exploitée : des coûts **trois fois meilleurs que le professeur**, physiquement impossibles.
- Correction : **RK4 partout**. Un virage stabilisé perd exactement le taux de chute de la polaire, même à pas de 0,4 s.
- Seule la loi réactive était touchée en ligne : $-3{,}73$ (Euler) contre $-3{,}57$ (RK4).

Leçon

Un optimiseur puissant branché sur un simulateur trouve ses défauts avant de trouver la physique. Tout gain surprenant doit être vérifié par un intégrateur plus précis.

Réalisme : l'avance venait-elle de virages impossibles ?

Un même rayon minimal pour tous (77 situations)

Rayon min.	Professeur	GA latent	Écart
aucun	−5,22	−6,06	−0,85
12 m	−5,22	−5,86	−0,64
15 m	−5,23	−5,56	−0,35
18 m	−5,09	−4,42	+0,67

Aile par tronçons, VAE entraîné en point-masse

Méthode	Résolues	Coût
Professeur	100 %	−4,70
GA latent	100 %	−4,28
64 tirages du prior	66 %	−1,23

- Le GA gagnait surtout **en serrant ses cercles** (rayon médian 15–25 m contre 21–29 m).
- Avec la vraie limite physique (décrochage de l'aile intérieure), **l'avance disparaît** : l'espace latent appris en point-masse ne contient pas les bons cercles.
- **Correction dans les données** : régénérer le professeur avec l'aile par tronçons et réentraîner (page suivante).

Aile par tronçons : professeur corrigé et réentraînement

Pourquoi le professeur échouait sur 39 % des situations (128 analysées) : dans 100 % des cas, la NLP finit avec **l'aile intérieure décrochée**.

Graine de la NLP	Faisable	Coût
Orbite plus rapide	**52 %**	$-4{,}63$
Plané droit	40 %	$+0{,}91$
Orbite plus large (80–120 m)	9–19 %	$\approx +1$
Sans marges	23–33 %	$\approx -5{,}3$

Une orbite *plus rapide* (pas plus large) baisse le C_L et rend une marge à l'aile intérieure. Professeur à 2 graines : **39 % → 17 %** non résolues ; l'orbite rapide gagne 83 % des trajectoires.

Réentraîné, cluster, 15 080 situations, 65 tests

Méthode	$d = 8$	$d = 16$	$d = 32$
Professeur	$-4{,}88$	$-4{,}88$	$-4{,}88$
Commandes du prof., volées	$-4{,}45$	$-4{,}45$	$-4{,}45$
64 tirages du prior	$-4{,}72$	$-4{,}64$	$-4{,}65$
GA latent	$-5{,}37$	$-5{,}69$	$-5{,}72$

L'avance revient : $-0{,}84$, la même que pour le point-masse ($-0{,}82$). Le prior repasse de 66 % à 100 % résolues.

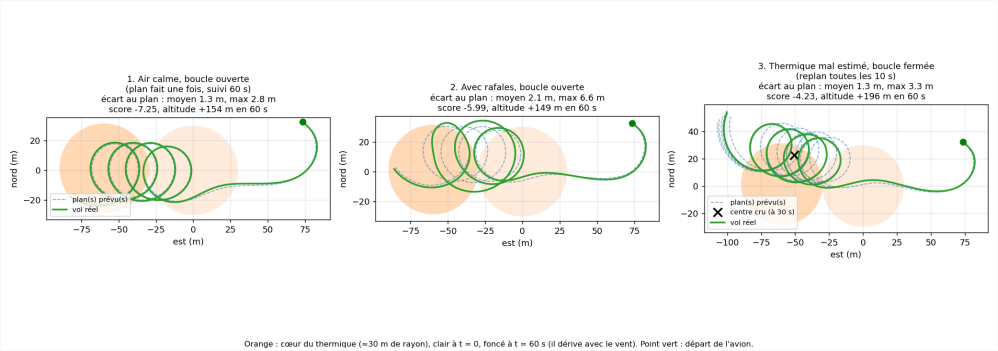
Piège rencontré : la loi réglée *sous* l'aile par tronçons convergeait vers des orbites irréparables (3/16 faisables contre 13/16) ; elle est réglée en point-masse et ne sert que de graine.

Sensibilité à la polaire estimée du SB-XC (65 situations, $d = 16$)

Avion	Professeur (résolues)	Prior	GA latent	Écart
nominal	−4,91 (100 %)	−4,64	−5,69	−0,79
$C_{D0} \times 0{,}8$	−5,48 (100 %)	−5,13	−6,29	−0,81
$C_{D0} \times 1{,}2$	−4,44 (100 %)	−4,24	−5,23	−0,79
$C_{L,\max} \times 1{,}2$	−5,30 (100 %)	−5,29	−6,24	−0,94
masse $\times 0{,}8$	−5,70 (100 %)	−5,57	−6,93	−1,23
$C_{L,\max} \times 0{,}8$	−4,11 (89 %)	−2,53	−4,49	−0,09
masse $\times 1{,}2$	−4,36 (100 %)	−2,81	−4,49	−0,13

- **La traînée ne compte pas** pour la comparaison : tout bouge de ≈0,5, l'écart reste à −0,8.
- **La marge au décrochage gouverne** : avion plus lourd ou $C_{L,\max}$ plus faible ⇒ l'avance tombe à −0,1 (toujours positive).
- Sans recherche, le prior **ne se transfère pas** à un autre avion.
- À mesurer sur l'avion réel : **charge alaire et** $C_{L,\max}$.

Phase 4 : boucle fermée, ce que l'avion vole vraiment



L'autopilote suit le plan à **1–2 m en moyenne** (6,6 m au pire en rafales). Avec un centre de thermique faux de ≈15 m, la spirale est propre mais **décalée** : l'avion monte en brûlant 4 fois plus de batterie.

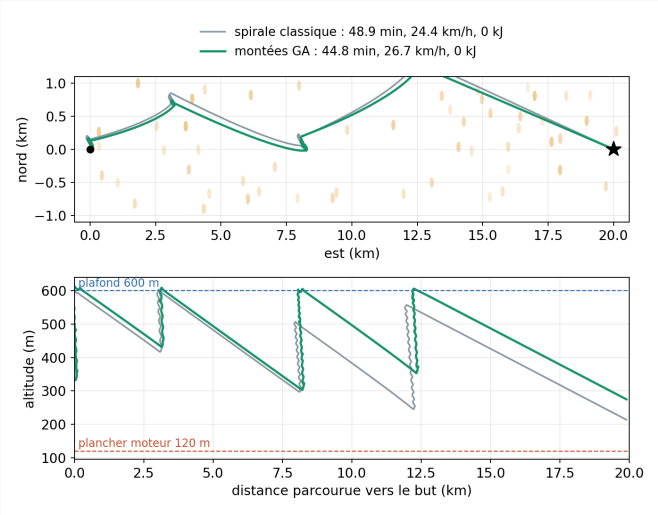
Autopilote : retard d'attitude 0,3 s, roulis limité, protection C_L à 90 %, inclinaison $\lesssim$40°, traînée d'aileron. MPC : replan toutes les 10 s, horizon jusqu'à la fin du vol, départ depuis l'état atteint, sens d'orbite conservé, démarrage à chaud.

Phase 4 : résultats (cluster, 65 situations $\times$ 4 conditions $\times$ 6 méthodes, 60 s)

Condition	Méthode	Coût volé	Sans violation	Décroche
calme	professeur, replan	−4,69	92 %	3 %
	GA, replan	−5,41	55 %	11 %
	prior, replan	−4,56	86 %	3 %
rafales	professeur, replan	−4,15	25 %	52 %
	GA, replan	−4,78	2 %	**92 %**
thermique mal estimé	professeur, replan	−2,03	37 %	35 %
	GA, replan	−1,87	3 %	85 %
les deux	professeur, replan	−1,87	3 %	85 %
	GA, replan	−1,64	2 %	97 %

- **En air calme, l'avance tient** et replanifier fait au moins aussi bien que la boucle ouverte.
- **L'erreur de position du thermique domine tout** : $-5 \rightarrow -2$, et replanifier n'y change rien tant que la croyance n'est pas corrigée.
- Les rafales font décrocher l'aile intérieure (run fait *avant* le limiteur de la phase 5).

Phase 5 : 20 km en enchaînant les thermiques



- Couloir de 2 km avec ≈1 thermique/km² qui dérivent ; départ 250–350 m, plafond 600 m, moteur sous 120 m.
- **Tacticien MacCready** (identique pour tous) : thermique au meilleur rythme de progression, sortie sous le réglage, plané final.
- Seule change **la façon de monter** : spirale classique, ou GA latent par blocs de 60 s, moteur coupé.
- Exemple : même tâche, 4 thermiques chacun ; 48,9 contre **44,8 min**.

Phase 5 : résultats (cluster, 64 tâches de 20 km, autopilote protégé)

Pilote	Batterie	Vitesse	Montée moyenne	Décroche	Sans violation
Tout au moteur	61,9 kJ	29,2 km/h	–	0 %	100 %
Spirale classique, MacCready 0,5	2,9 kJ	24,9 km/h	1,29 m/s	0 %	100 %
Spirale classique, MacCready 1	19,3 kJ	28,3 km/h	1,22 m/s	0 %	100 %
Montées GA, MacCready 0,5	2,9 kJ	**28,2 km/h**	**2,08 m/s**	**0 %**	98 %
Montées GA, MacCready 1	**4,7 kJ**	**29,5 km/h**	**2,07 m/s**	**0 %**	100 %
GA avec marge de 20 %, MacCready 1	4,7 kJ	29,0 km/h	1,90 m/s	0 %	100 %

- **+61 % de vitesse de montée** ; à réglage égal **+3,3 km/h** pour la même batterie, plus rapide sur **89 %** des tâches.
- À MacCready 1 : **la vitesse du vol au moteur avec 13 fois moins de batterie** (meilleur que la spirale sur 73 % des tâches).
- Sans limiteur, 19 à 69 % des vols du GA décrochaient une section. **Le limiteur d'aile intérieure dans l'autopilote** supprime tous les décrochages *sans* réduire l'avance (2,08 contre 2,09 m/s) : le gain ne venait pas du vol au bord du décrochage.

Phase 6 : distiller la recherche (cluster, 65 situations de test)

Méthode	Résolues	Coût	Écart	Temps
Professeur	100 %	−4,88	–	≈35 s
64 tirages du prior du VAE	100 %	−4,64	+0,24	0,24 s
Générateur distillé, 1 tirage	94 %	−3,52	+1,30	0,14 s
Générateur distillé, 64 tirages	100 %	−5,72	−0,85	**0,24 s**
Distillé + GA court (300 vols)	100 %	−5,59	−0,71	1,4 s
GA latent (3 000 vols), la cible	100 %	−5,66	−0,78	13,4 s

Le GA résout 3 000 situations d'entraînement ; un flow matching conditionnel apprend ses meilleurs points de l'espace latent ; en test, ses tirages sont décodés et volés comme tout candidat.

- **Autant que le GA, 57 fois plus vite**, et 0,85 de mieux que le professeur dans le temps du prior.
- **Un tirage ne suffit pas** : c'est « proposer 64, vérifier par la physique, garder le meilleur » qui marche.
- Une recherche courte par-dessus n'apporte rien.
- **Le plan initial tient**, dans l'ordre découvert : explorer hors ligne (GA dans un espace appris), distiller (flow matching), proposer et vérifier en vol.

Phase 6 : le générateur en vol de 20 km, et un tour de DAgger

Montées (64 tâches de 20 km), MacCready 0,5 / 1	Montée moyenne	Vitesse	Batterie	Temps par plan
Spirale classique	1,29 / 1,22 m/s	24,9 / 28,3 km/h	2,9 / 19,3 kJ	réflexe
GA latent	2,08 / 2,07 m/s	28,2 / 29,5 km/h	2,9 / 4,7 kJ	≈13 s
Générateur distillé sur S1 seulement	**1,50 / 1,17 m/s**	25,1 / 28,8 km/h	4,2 / 20,2 kJ	0,24 s
Générateur après un tour de DAgger	**2,23 / 2,20 m/s**	**28,5 / 30,2 km/h**	2,9 / 4,7 kJ	**0,24 s**

- **Hors de sa distribution, le premier générateur s'effondre** : appris sur des départs en vol droit entre 180 et 320 m, il replanifie en plein virage jusqu'à 600 m, sans connaître l'inclinaison actuelle.
- **DAgger** : 1 095 plans de montée gagnés par le GA en vol sont enregistrés (situation, état de l'avion, point latent) ; le générateur est réentraîné dessus, avec l'inclinaison, la vitesse et le C_L dans sa condition.
- Résultat : **aussi bien que le GA, et légèrement mieux** (plus rapide sur 84 % et 77 % des tâches), en 0,24 s par plan ; à MacCready 1, **plus rapide que le moteur** (30,2 contre 29,2 km/h) avec 13 fois moins de batterie ; 0 décrochage ; inchangé sur les situations S1 ($-5{,}72$).

Ce qu'on a découvert

1. **Un GA échoue sur la trajectoire brute mais bat son professeur dans un espace appris.** Même algorithme, autre représentation : 55 % $\rightarrow$ 100 % résolues, puis $-0{,}82$ à $-0{,}84$ sous le professeur.
2. **Mettre la physique dans le décodeur** (sortir des commandes bornées et les simuler) règle la faisabilité : 20 % $\rightarrow$ 100 %. 64 tirages égalent le professeur en 0,2 s.
3. **Un optimiseur trouve d'abord les défauts du simulateur** (énergie gratuite d'Euler, $\times 3$).
4. **La limite réelle d'un planeur en spirale est le décrochage de l'aile intérieure**, pas le rayon : le bon remède est une orbite plus rapide, pas plus large ; la marge au décrochage (charge alaire, $C_{L,\max}$) gouverne le gain, la traînée non.
5. **Un MPC à énergie terminale procrastine** : un horizon glissant de 60 s repousse sans fin le gain ; il faut viser la fin du vol (horizon qui rétrécit).
6. **En vol, savoir où est le thermique compte plus que bien planifier** : 15 m d'erreur coûtent plus que la turbulence.
7. **Sur 20 km, mieux spiraler vaut des km/h** ($+3{,}3$) ou une batterie divisée par 13 ; **la sécurité se met dans l'autopilote**, pas dans les marges du plan.
8. **La recherche se distille, à condition de lui montrer les situations du vol** : un flow matching entraîné sur les solutions du GA fait aussi bien que lui en 0,24 s, mais seulement après un tour de DAgger sur les états rencontrés en vol.

Portée et limites

Ce que les résultats couvrent

- Un motoplaneur de 4,2 kg (SB-XC), polaire estimée testée à $\pm 20\,\%$.
- Thermiques isolés, champs de thermiques sur 20 km, vent 0–4 m/s, turbulence légère.
- Tests sur situations jamais vues ; 64 à 80 situations par comparaison ; comparaisons appariées.

Ce qu'ils ne couvrent pas encore

- **Simulation seulement** : point-masse 3 DDL + aile par tronçons, pas de 6 DDL ni de vol réel.
- Modèle de thermique synthétique (Allen + cœur gaussien) ; en phase 5, **thermiques connus exactement**.
- 17 % des situations restent non résolues par le professeur et sont exclues des tests.
- Le générateur (0,24 s par plan sur un cœur de serveur) n'est pas encore mesuré sur calculateur embarqué ; un seul tour de DAgger, un seul run par configuration.
- Au-dessus de 320 m, le VAE sort de ses données d'entraînement.

Moyens de calcul

- **Cluster Slurm** : tableaux SLURM de 21 nœuds de 32 cœurs pour le professeur (15 080 situations en ≈15 min), GPU A40 pour les élèves, un nœud par étude (sensibilité, boucle fermée, 20 km).
- **PC de calcul (qltus1, qltus2)** : 3 080 situations en 1 h 15 ; Python 3.14 environ 4 fois plus rapide par cœur que le gros PC.
- **Code** : NumPy/SciPy pour l'optimisation et la simulation, PyTorch pour les élèves ; 69 tests ; dépôt public `github.com/clementdumeril/GeneticWing`.
- **Visualiseurs 3D** : vols de 60 s autour d'un thermique, et vol de 20 km (pages autonomes dans `docs/viewer`).

La suite

1. **Recentrer le thermique en vol** (estimateur à partir du vario, comme ArduPilot) : c'est la plus grosse perte mesurée (de -5 à -2), et la phase 5 suppose aujourd'hui des thermiques connus.
2. **Réentraîner le VAE sur des montées jusqu'à 600 m**, et le conditionner sur la charge alaire et $C_{L,\max}$.
3. **Les 17 % de situations non résolues** par le professeur.
4. **Un second tour de DAgger** (les montées du générateur lui-même, relabellisées par le GA), puis le générateur dans la boucle fermée de la phase 4 (rafales, croyance fausse).
5. **Vers le réel** : simulateur 6 DDL ou SITL, puis mesures de l'avion.