

Rompre le monolithe : un cadre diagnostique pour l'origine des trous noirs supermassifs primordiaux

Andrei Eleodor Sirbu

8 février 2026

Résumé

La découverte de trous noirs supermassifs de plusieurs milliards de masses solaires au cours des 500 à 800 premiers millions d'années de l'Univers a profondément remis en question les modèles de formation monolithiques. Les observations récentes de JWST et ALMA (2024–2026) dressent le portrait d'un Univers primordial chaotique, riche en gaz, où l'accrétion extrême et les processus de rétroaction étaient monnaie courante. Nous soutenons que le champ doit abandonner la recherche d'une « solution » unique au profit du développement d'un cadre diagnostique capable de distinguer plusieurs voies de formation coexistant simultanément.

Nous proposons trois canaux généraux : avalanches d'accrétion froide chaotique, effondrement direct monolithique, et fusions hiérarchiques rapides — chacun laissant des signatures distinctes dans la cinématique, la métallicité et l'environnement hôte des quasars à haut décalage vers le rouge. Nous exposons les principaux tests observationnels rendus possibles par JWST, ALMA et les observatoires d'ondes gravitationnelles de prochaine génération, afin de quantifier la contribution relative de chaque voie à la population émergente de trous noirs supermassifs précoces.

Table des matières

1	L'énigme observationnelle et le changement de paradigme	4
1.1	La crise temporelle : quantifier le défi de la croissance	4
1.2	La révolution JWST : un nouveau paysage observationnel . . .	5
1.2.1	Cas observationnels spécifiques à l'origine du change- ment de paradigme	6
1.3	L'effondrement des explications monolithiques	6
2	Un cadre diagnostique pour la formation précoce des SMBH	7
2.1	Voie 1 : avalanche d'accrétion froide chaotique	8
2.1.1	Mécanisme physique	8
2.1.2	Conditions du piégeage du rayonnement	9
2.1.3	Pré-requis environnementaux	9
2.1.4	Signatures observationnelles clés	9
2.1.5	Critères diagnostiques quantitatifs	10
2.2	Voie 2 : effondrement direct monolithique	10
2.2.1	Mécanisme physique	10
2.2.2	Pré-requis environnementaux	11
2.2.3	Signatures observationnelles clés	12
2.2.4	Critères diagnostiques quantitatifs	12
2.3	Voie 3 : fusions hiérarchiques rapides	13
2.3.1	Mécanisme physique	13
2.3.2	Croissance en régime d'emballement	14
2.3.3	Pré-requis environnementaux	14
2.3.4	Signatures observationnelles clés	14
2.3.5	Critères diagnostiques quantitatifs	15
2.4	Résumé : tableau des diagnostics observationnels	15
2.4.1	Comparaisons avec les simulations cosmologiques . . .	16
3	Stratégie observationnelle et calendrier	17
3.1	Phase 1 (2025–2027) : recensement à grand champ avec le JWST	18
3.1.1	Objectifs scientifiques	18
3.1.2	Échantillon de cibles	18
3.1.3	Stratégie observationnelle	18
3.1.4	Résultats attendus	19
3.2	Phase 2 (2026–2029) : dynamique à haute résolution avec ALMA	20
3.2.1	Objectifs scientifiques	20
3.2.2	Échantillon de cibles	20
3.2.3	Stratégie observationnelle	20
3.2.4	Analyse et diagnostics	21

3.2.5	Résultats attendus	22
3.3	Phase 3 (2030–2035) : contraintes par ondes gravitationnelles sur les voies de fusion	22
3.3.1	Objectifs scientifiques	22
3.3.2	Instruments et capacités	22
3.3.3	Stratégie observationnelle	23
3.3.4	Résultats attendus	24
3.4	Calendrier intégré et jalons	24
3.5	Stratégie d’analyse des données et de modélisation	25
3.5.1	Cadre bayésien pour la classification des voies de for- mation	25
3.5.2	Modèles de synthèse de population	26
3.5.3	Comparaison avec les simulations cosmologiques	26
3.6	Impact attendu et héritage scientifique	26
3.7	Incertitudes et défis dans la discrimination des voies de formation	27
4	Conclusion	28
4.1	D’une énigme à une sonde : un nouveau paradigme pour l’étude précoce des trous noirs	28
4.2	La voie à suivre : de la théorie à la mesure	29
4.3	Implications plus larges : les trous noirs précoces comme sondes cosmiques	30
4.3.1	Sonder les premières étoiles et galaxies	30
4.3.2	Contraindre la matière noire et la formation des struc- tures	31
4.3.3	Tester la co-évolution des trous noirs et des galaxies	31
4.3.4	Implications pour l’astronomie des ondes gravitation- nelles	32
4.4	Questions ouvertes et perspectives futures	32
4.5	Remarques finales : assumer la complexité	33

1 L'énigme observationnelle et le changement de paradigme

1.1 La crise temporelle : quantifier le défi de la croissance

L'existence de quasars alimentés par des trous noirs supermassifs (SMBH) de masse $\sim 10^9 M_\odot$ à des décalages vers le rouge $z > 7$ constitue un défi majeur pour les modèles de formation et de croissance des trous noirs. Pour apprécier la sévérité de cette contrainte, considérons le scénario de croissance standard : un résidu stellaire de Population III, de masse initiale $M_0 \sim 100 M_\odot$, accrétant à la limite d'Eddington.

Le temps caractéristique d'e-folding pour une accrétion limitée par Eddington est donné par :

$$t_{\text{Edd}} = \frac{\sigma_T c}{4\pi G m_p \epsilon} \simeq 45 \text{ Myr} \left(\frac{\epsilon}{0.1} \right)^{-1}, \quad (1)$$

où σ_T est la section efficace de Thomson, m_p la masse du proton, et $\epsilon \sim 0.1$ l'efficacité radiative. Pour croître de $100 M_\odot$ à $10^9 M_\odot$, il faut :

$$N_{\text{fold}} = \frac{\ln(M_{\text{final}}/M_0)}{\ln 2} \simeq \frac{\ln(10^9/10^2)}{\ln 2} \approx 23.3 \text{ e-foldings}. \quad (2)$$

Cela correspond à un temps de croissance minimal de :

$$t_{\text{growth}} = N_{\text{fold}} \times t_{\text{Edd}} \simeq 1.05 \text{ Gyr}, \quad (3)$$

en supposant une accrétion *continue* à la limite d'Eddington, sans aucune interruption. Or, l'âge cosmique à $z = 7$ n'est que de ~ 770 Myr, et à $z = 10$ il se réduit à ~ 480 Myr — ne laissant pratiquement aucune marge pour des cycles d'activité réalistes, des phases de quiescence induites par la rétroaction, ou des délais liés à la formation des germes.

Même en adoptant des hypothèses optimistes — telles qu'un facteur de cycle d'activité de $f_{\text{duty}} = 0.5$ (50 % du temps passé en phase d'accrétion active) — le temps requis atteint ~ 2.1 Gyr, bien au-delà de l'âge de l'Univers à ces redshifts. **Il ne s'agit pas d'une tension modérée, mais d'une véritable crise temporelle, qui exige soit (1) des mécanismes de formation de germes radicalement différents produisant $M_{\text{seed}} \gtrsim 10^4\text{--}10^5 M_\odot$, soit (2) une accrétion super-Eddington soutenue avec $\dot{M} \gg \dot{M}_{\text{Edd}}$, soit (3) un assemblage hiérarchique rapide par fusions.**

1.2 La révolution JWST : un nouveau paysage observationnel

Les observations récentes du *James Webb Space Telescope* (JWST) et de l'*Atacama Large Millimeter/submillimeter Array* (ALMA) ont profondément transformé notre vision du premier milliard d'années de l'Univers. Loin de correspondre à une époque primitive et quiescente, l'Univers à haut redshift apparaît désormais comme un creuset violent de formation des structures, caractérisé par :

- **Galaxies ultra-compactes et lumineuses à $z > 10$:** Les relevés NIRCам du JWST ont mis en évidence des galaxies de masses stellaires $M_* \sim 10^9\text{--}10^{10} M_\odot$, confinées dans des rayons effectifs $R_{\text{eff}} < 0.5$ kpc [1]. Ces densités de surface extrêmes ($\Sigma_* > 10^{10} M_\odot \text{kpc}^{-2}$) impliquent une formation stellaire rapide et efficace au sein d'environnements riches en gaz.
- **Écoulements sortants puissants et à grande vitesse :** Les observations NIRSspec de sources à larges raies révèlent des vitesses d'écoulement sortant dépassant $v_{\text{out}} \sim 1000\text{--}2000 \text{ km s}^{-1}$ [2], caractéristiques d'une rétroaction entraînée par les noyaux actifs de galaxies (AGN) déposant de l'énergie cinétique à des taux $\dot{E}_{\text{kin}} \sim 10^{44}\text{--}10^{45} \text{ erg s}^{-1}$. Une telle injection d'énergie est suffisante pour désolidariser une fraction significative du réservoir de gaz de la galaxie hôte.
- **Gaz froid filamentaireux abondant :** Les détections ALMA de l'émission [C II] à $158 \mu\text{m}$ tracent un gaz froid ($T \sim 10^3\text{--}10^4 \text{ K}$) et dense ($n_{\text{H}} \sim 10^3\text{--}10^4 \text{ cm}^{-3}$), organisé en structures filamentaires s'étendant sur plusieurs kiloparsecs autour des hôtes de quasars [3]. Ces filaments constituent les principaux canaux d'alimentation de la croissance des trous noirs, avec des taux d'inflow de masse estimés à $\dot{M}_{\text{gas}} \sim 10\text{--}100 M_\odot \text{ yr}^{-1}$.
- **Rapports extrêmes entre masse du trou noir et masse stellaire :** Plusieurs quasars à $z > 7$ présentent des rapports $\dot{M}_{\text{BH}}/M_* \sim 0.01\text{--}0.1$ [4], soit des valeurs de 5 à 50 fois supérieures à la relation locale $\dot{M}_{\text{BH}}\text{--}M_{\text{bulge}}$ ($\dot{M}_{\text{BH}}/M_* \sim 0.002$). Cela suggère soit une croissance extrêmement rapide du trou noir, soit une assemblage retardé de la masse stellaire, soit encore une formation suivant des voies qui découplent la croissance du trou noir de celle de sa galaxie hôte.

1.2.1 Cas observationnels spécifiques à l’origine du changement de paradigme

Les découvertes récentes cristallisent le défi actuel et mettent en évidence la nécessité d’un cadre à voies multiples. Si nous utilisons des archétypes hypothétiques tels que JADES-GS-z13-0 et UHZ1 pour illustrer des cas extrêmes, des objets réels observés par le JWST et ALMA confirment la diversité du phénomène :

1. **GN-z11** : Quasar confirmé à $z = 10.6$ (âge cosmique ~ 430 Myr), avec une masse de trou noir virielle de $\simeq (1.6 \pm 0.5) \times 10^6 M_\odot$ déduite des raies UV [5]. Son hôte compact ($R_{\text{eff}} < 0.1$ kpc) et son rapport élevé entre la masse du trou noir et la masse stellaire (~ 0.1) suggèrent une croissance rapide par accrétion chaotique ou effondrement direct, tandis que la cinématique [C II] observée par ALMA indique une dispersion de vitesse $\sigma \sim 100 \text{ km s}^{-1}$.
2. **CEERS-1019** : À $z = 8.7$, ce système présente une région à larges raies pauvre en métaux ($[\text{Fe}/\text{H}] \simeq -2.5$) mais un gaz hôte enrichi ($[\text{O}/\text{H}] \sim -1.0$), une configuration analogue aux signatures attendues de l’effondrement direct [6]. Les images NIRCам révèlent une morphologie asymétrique, suggérant potentiellement des fusions récentes.

Ces objets — ainsi que plus de 20 quasars confirmés à $z > 7$ issus des relevés JWST tels que JADES et CEERS — illustrent une forte hétérogénéité, avec des propriétés s’étendant d’environnements compacts et enrichis à des milieux étendus et pauvres en métaux, soulignant la coexistence de plusieurs canaux de formation.

1.3 L’effondrement des explications monolithiques

Le consensus émergent est qu’aucun mécanisme unique — qu’il s’agisse d’un canal particulier de formation des germes ou d’un mode d’accrétion singulier — ne peut rendre compte à lui seul de la diversité et de l’extrême nature de la population observée. Les tentatives visant à invoquer une solution universelle se heurtent à de sérieuses difficultés :

- **Germes d’origine purement stellaire** : Même en invoquant des facteurs d’accrétion super-Eddington de 2 à 3, les échelles de temps requises demeurent marginales, et ce scénario ne parvient pas à expliquer les rapports extrêmes $/M_*$ ni l’existence de régions à larges raies (BLR) pauvres en métaux.
- **Effondrement direct pur** : Bien que l’effondrement direct produise des germes massifs ($\sim 10^5 M_\odot$), les conditions environnementales requises

(rayonnement Lyman–Werner intense, gaz dépourvu de métaux) sont rares et ne permettent pas d’expliquer la densité numérique observée des quasars à $z > 7$ ($\Phi \sim 10^{-9} \text{ Mpc}^{-3} \text{ mag}^{-1}$).

- **Croissance uniquement pilotée par les fusions :** Les fusions hiérarchiques peuvent conduire à une croissance rapide des trous noirs dans des environnements denses, mais cette voie suppose l’existence préalable de populations de trous noirs de masse intermédiaire et ne produit pas aisément les signatures pauvres en métaux observées dans certains systèmes.

Il convient dès lors de considérer un **paysage de voies de formation**, dont l’importance relative est déterminée par des facteurs environnementaux locaux tels que :

- La densité du gaz et la dispersion turbulente des vitesses ($\rho_{\text{gas}}, \sigma_{\text{gas}}$)
- Le moment angulaire et le soutien rotationnel (j, λ)
- La concentration du halo de matière noire et l’historique des fusions ($c_{\text{vir}}, N_{\text{major}}$)
- L’intensité et le spectre des champs de rayonnement ambiants (fond Lyman–Werner J_{LW} , luminosité X L_X)
- La métallicité et le contenu en poussières du milieu interstellaire ($Z_{\text{ISM}}, \Sigma_{\text{dust}}$)

L’objectif de ce travail est de formuler un **cadre diagnostique** reliant les propriétés observées — cinématique, métallicité, morphologie et environnement hôte — à la ou aux voies de formation dominantes pour chaque système. Ce faisant, nous transformons le « problème de la formation des SMBH » d’une quête de *la* mécanisme en une étude démographique quantitative de *plusieurs canaux coexistant*, façonnés par les conditions extrêmes du premier milliard d’années.

2 Un cadre diagnostique pour la formation précoce des SMBH

La formation des trous noirs supermassifs au cours du premier milliard d’années de l’histoire cosmique ne saurait être régie par un mécanisme unique et universel. L’extrême diversité des conditions physiques prévalant dans l’Univers à haut redshift engendre au contraire, de façon naturelle, plusieurs canaux de croissance des trous noirs, dont l’importance relative est déterminée par l’environnement local plutôt que par les seules conditions initiales.

Dans cette section, nous introduisons un cadre diagnostique visant à organiser cette diversité de manière physiquement transparente. Plutôt que de considérer les scénarios de formation proposés comme des solutions mutuellement exclusives, nous les envisageons comme des régimes distincts au sein d’un paysage plus large de la formation des structures précoces. Chaque régime est caractérisé par des conditions environnementales spécifiques, des processus physiques dominants, ainsi que par des empreintes observables laissées sur la galaxie hôte et le milieu environnant.

Le tableau 1 fournit une vue d’ensemble conceptuelle de ce cadre, illustrant la manière dont les systèmes à haut redshift sont orientés vers trois voies principales de formation : les *avalanches d’accrétion froide chaotique*, l’*effondrement direct monolithique* et les *fusions hiérarchiques rapides*. Ces voies représentent des comportements limites plutôt que des catégories exhaustives, et peuvent coexister au sein de la population précoce de SMBH. Leurs principales signatures observationnelles, ainsi que les diagnostics associés aux instruments, sont résumés dans le tableau 1.

2.1 Voie 1 : avalanche d’accrétion froide chaotique

2.1.1 Mécanisme physique

Des germes légers, de masse $M_{\text{seed}} \sim 10^2\text{--}10^3 M_{\odot}$, issus de l’effondrement d’étoiles de Population III, sont plongés dans un réseau dense et turbulent de gaz froid, pauvre en métaux. Contrairement à l’image idéalisée d’une accrétion lisse au sein d’un disque géométriquement mince, la croissance se fait ici par le biais d’*inflows asymétriques et chaotiques* ainsi que par des collisions directes de nuages. Dans ce régime, le trou noir central est alimenté par de multiples filaments froids possédant des moments angulaires variables, ce qui engendre un écoulement d’accrétion fortement variable dans le temps et spatialement complexe.

La clé permettant de maintenir des taux d’accrétion super- ou hyper-Eddington ($\dot{M} \sim 10\text{--}100 M_{\odot} \text{ yr}^{-1}$) pendant des dizaines de millions d’années réside dans le **piégeage du rayonnement**. Lorsque l’écoulement d’accrétion est suffisamment épais optiquement et géométriquement complexe, le rayonnement produit à proximité de l’horizon des événements ne peut s’échapper efficacement. Il est au contraire absorbé et retraité à de multiples reprises avant d’atteindre la frontière externe, réduisant ainsi de manière effective la pression radiative exercée sur la matière en chute.

2.1.2 Conditions du piégeage du rayonnement

Pour que le piégeage du rayonnement soit efficace, la profondeur optique de l'écoulement d'accrétion doit satisfaire :

$$\tau_{\text{eff}} = \kappa \Sigma_{\text{gas}} > \frac{c}{v_{\text{infall}}} \sim 100, \quad (4)$$

où $\kappa \sim 0.34 \text{ cm}^2 \text{ g}^{-1}$ est l'opacité de diffusion électronique, Σ_{gas} la densité de surface du gaz en inflow, et $v_{\text{infall}} \sim 0.01c$ la vitesse caractéristique d'accrétion.

En outre, le **facteur de recouvrement** du gaz froid et dense doit être élevé. Dans une géométrie à filaments multiples, le taux d'accrétion effectif peut s'écrire :

$$\dot{M}_{\text{eff}} \simeq \frac{f_{\text{cover}}}{1 - f_{\text{cover}}} \dot{M}_{\text{Edd}}, \quad (5)$$

où f_{cover} désigne la fraction de l'angle solide recouverte par du gaz dense. Des simulations récentes de magnéto-radiation-hydrodynamique [7] indiquent que $f_{\text{cover}} \sim 0.7\text{--}0.9$ dans des systèmes hautement turbulents alimentés par des filaments à $z > 7$, permettant ainsi des taux d'accrétion soutenus de l'ordre de $\dot{M} \sim 5\text{--}20 \dot{M}_{\text{Edd}}$.

2.1.3 Pré-requis environnementaux

Pour que l'avalanche d'accrétion froide chaotique puisse opérer, le système hôte doit satisfaire les conditions suivantes :

- **Densité de gaz élevée** : $\rho_{\text{gas}} \gtrsim 10^{-21} \text{ g cm}^{-3}$ ($n_{\text{H}} \gtrsim 10^3 \text{ cm}^{-3}$) à des rayons galactocentriques $r \sim 100\text{--}1000 \text{ pc}$.
- **Faible métallicité** : $Z \lesssim 0.1 Z_{\odot}$ afin de minimiser le refroidissement radiatif et de maintenir un soutien de pression contre la fragmentation.
- **Forte dispersion turbulente des vitesses** : $\sigma_{\text{turb}} \sim 50\text{--}100 \text{ km s}^{-1}$ pour empêcher le gaz de se stabiliser dans un disque mince et stable.
- **Géométrie d'inflow filamenteuse** : Plusieurs flux froids présentant des moments angulaires désalignés, caractéristiques de l'accrétion cosmologique dans des halos de matière noire de masse $M_{\text{halo}} \sim 10^{11}\text{--}10^{12} M_{\odot}$ à $z \sim 7\text{--}10$.

2.1.4 Signatures observationnelles clés

Les systèmes dominés par des avalanches d'accrétion froide chaotique sont censés présenter :

1. **Cartes cinématiques révélant des inflows chaotiques et des outflows bipolaires** : Les observations IFU de NIRSpec devraient mettre en évidence des champs de vitesses complexes, avec des vitesses d'inflow $v_{\text{in}} \sim 200\text{--}500 \text{ km s}^{-1}$ et des vitesses d'outflow $v_{\text{out}} > 1500 \text{ km s}^{-1}$. Les outflows devraient être orientés perpendiculairement au plan d'inflow du gaz, sculptant des cavités bipolaires dans le milieu interstellaire (ISM).
2. **Distribution homogène de la métallicité dans le gaz ionisé** : La turbulence induite par l'AGN mélange efficacement les métaux à des échelles kiloparsec. La dispersion des mesures de métallicité à travers la galaxie hôte devrait être faible, $\sigma([\text{O}/\text{H}]) < 0.15 \text{ dex}$, même si la métallicité moyenne est sous-solaire.
3. **Morphologie hôte compacte et façonnée par la rétroaction** : La galaxie hôte devrait être compacte ($R_{\text{eff}} < 1 \text{ kpc}$), avec une morphologie perturbée, dépourvue de disque ou de sphéroïde bien définis. La sphère d'influence du trou noir, $r_{\text{infl}} = G/\sigma_*^2$, devrait être comparable au rayon effectif, impliquant $/M_{\text{dyn}} \sim 0.005\text{--}0.01$.
4. **Forte variabilité de luminosité** : La nature épisodique des collisions entre filaments devrait engendrer des fluctuations de luminosité sur des échelles de temps allant de quelques mois à quelques années (dans le référentiel propre), avec des amplitudes $\Delta L/L \sim 0.3\text{--}1.0$.

2.1.5 Critères diagnostiques quantitatifs

Un quasar peut être classé comme **candidat à une avalanche d'accrétion froide chaotique** s'il satisfait au moins trois des critères suivants :

- Vitesse d'outflow : $v_{\text{out}} > 1500 \text{ km s}^{-1}$
- Dispersion de la métallicité : $\sigma([\text{O}/\text{H}]) < 0.15 \text{ dex}$
- Rapport entre la masse du trou noir et la masse dynamique : $0.003 < /M_{\text{dyn}} < 0.02$
- Rayon effectif : $R_{\text{eff}} < 1 \text{ kpc}$
- Dispersion de vitesse $[\text{C II}]$: $\sigma_{[\text{C II}]} > 80 \text{ km s}^{-1}$

2.2 Voie 2 : effondrement direct monolithique

2.2.1 Mécanisme physique

Dans de rares nuages de gaz massifs ($>10^8 M_{\odot}$), dépourvus de métaux et thermiquement stabilisés, la fragmentation est inhibée, conduisant à la

formation d’une étoile supermassive (SMS) de masse $M_{\text{SMS}} > 10^5 M_{\odot}$. Cette SMS épuise rapidement son combustible nucléaire et s’effondre directement en un germe de trou noir massif sur des échelles de temps de l’ordre de $\sim 10^5$ ans, court-circuitant les étapes intermédiaires de formation et de croissance des trous noirs de masse stellaire.

L’élément clé est que l’effondrement direct requiert la **suppression du refroidissement par H_2** , qui permettrait autrement au gaz de se fragmenter en amas de masse stellaire. Deux mécanismes principaux peuvent assurer cette suppression :

1. **Rayonnement Lyman–Werner (LW)** : Les photons d’énergie comprise entre 11.2 et 13.6 eV dissocient les molécules de H_2 sans ioniser l’hydrogène. Un fond Lyman–Werner suffisamment intense ($J_{\text{LW}} > 100 J_{21}$, où J_{21} désigne le flux exprimé en unités de $10^{-21} \text{ erg s}^{-1} \text{ cm}^{-2} \text{ Hz}^{-1} \text{ sr}^{-1}$) peut maintenir la température du gaz au-dessus de $T \sim 10^4 \text{ K}$, empêchant ainsi le refroidissement médié par H_2 .
2. **Chauffage dynamique lors de collisions de halos** : Lorsque deux halos de matière noire riches en gaz entrent en collision avec des vitesses relatives $v_{\text{rel}} \sim 100\text{--}200 \text{ km s}^{-1}$, le chauffage par chocs peut élever la température du gaz jusqu’à $T \sim (3/2) \mu m_p v_{\text{rel}}^2 / k_B \sim 10^5 \text{ K}$, bien au-delà du seuil de refroidissement par H_2 . Dans ce scénario, les halos peuvent être temporairement appauvris en matière noire du fait des interactions gravitationnelles, créant ainsi un environnement pauvre en matière noire.

2.2.2 Pré-requis environnementaux

Pour que l’effondrement direct monolithique puisse se produire, les conditions suivantes doivent être réunies :

- **Température du gaz** : $T_{\text{gas}} > 10^4 \text{ K}$ durant l’ensemble de la phase d’effondrement.
- **Métallicité** : $Z < 10^{-4} Z_{\odot}$ ($[\text{Fe}/\text{H}] < -4$) afin d’empêcher le refroidissement par raies métalliques (par exemple via C, O, Si).
- **Masse de gaz** : $M_{\text{gas}} > 10^7 M_{\odot}$ pour garantir que l’étoile supermassive atteigne une masse suffisante avant que la combustion nucléaire ne modifie significativement sa structure.
- **Moment angulaire** : Moment angulaire spécifique $j < 0.1 j_{\text{vir}}$, où $j_{\text{vir}} = \sqrt{GM_{\text{halo}} r_{\text{vir}}}$ est la valeur virielle, condition nécessaire pour permettre un inflow rapide.
- **Fond Lyman–Werner (le cas échéant)** : $J_{\text{LW}} > 100 J_{21}$ maintenu sur des durées de l’ordre de $\sim 10^5\text{--}10^6$ ans.

Le temps de chute libre pour un tel système est donné par :

$$t_{\text{ff}} = \sqrt{\frac{3\pi}{32G\rho_{\text{gas}}}} \sim 10^5 \text{ ans} \left(\frac{n_{\text{H}}}{10^4 \text{ cm}^{-3}} \right)^{-1/2}, \quad (6)$$

en accord avec l'échelle de temps attendue pour la formation et l'effondrement d'une étoile supermassive.

2.2.3 Signatures observationnelles clés

Les trous noirs issus de l'effondrement direct devraient pouvoir être identifiés à partir des signatures suivantes :

1. **Rapport extrême entre la masse du trou noir et la masse dynamique :** $M_{\text{BH}}/M_{\text{dyn}} > 0.01$, valeur nettement supérieure à la relation locale $M_{\text{BH}}-M_{\text{bulge}}$ (~ 0.002). Cela reflète le fait que le trou noir s'est formé avant toute assemblage significatif de masse stellaire.
2. **Région à larges raies (BLR) exceptionnellement pauvre en métaux :** $[\text{Fe}/\text{H}] < -3$ dans le gaz photoionisé par l'AGN, même si la galaxie hôte présente des indices de formation stellaire antérieure. Cette dichotomie s'explique par le fait que le trou noir accrète à partir du réservoir de gaz primordial ayant donné naissance à l'étoile supermassive, tandis que les étoiles se forment à partir d'inflows ultérieurs enrichis.
3. **Population stellaire coévale faible ou absente :** La masse stellaire contenue dans un rayon de ~ 1 kpc autour du quasar devrait être faible, $M_* < 10^8 M_{\odot}$, et la population stellaire devrait être soit très jeune (< 10 Myr), soit présenter un décalage d'âge marqué par rapport à l'activité du quasar.
4. **Hôte cinématiquement calme :** En l'absence d'une masse significative de matière noire ou de composante stellaire dominante, la galaxie hôte devrait présenter une faible dispersion de vitesses ($\sigma_* < 50 \text{ km s}^{-1}$) et être dépourvue de rotation organisée. Ce comportement est particulièrement attendu dans le scénario d'effondrement direct associé à des collisions de halos pauvres en matière noire.
5. **Faible contenu en poussières :** Rapport poussières/gaz $D/G < 0.01 \times (D/G)_{\text{MW}}$, en accord avec la faible métallicité du gaz.

2.2.4 Critères diagnostiques quantitatifs

Un quasar peut être classé comme **candidat à l'effondrement direct monolithique** s'il satisfait au moins trois des critères suivants :

- Rapport entre la masse du trou noir et la masse dynamique : $/M_{\text{dyn}} > 0.01$
- Métallicité de la BLR : $[\text{Fe}/\text{H}] < -3$
- Masse stellaire dans un rayon de 1 kpc : $M_* < 10^8 M_\odot$
- Dispersion de vitesses stellaires : $\sigma_* < 50 \text{ km s}^{-1}$
- Rapport poussières/gaz : $D/G < 0.01 \times (D/G)_{\text{MW}}$
- Décalage d'âge : âge de la population stellaire différent de l'âge du quasar de $> 50 \text{ Myr}$

2.3 Voie 3 : fusions hiérarchiques rapides

2.3.1 Mécanisme physique

Dans les cœurs extrêmement denses des premiers amas stellaires ou des galaxies naines, des trous noirs de masse stellaire ($M_{\text{BH}} \sim 10\text{--}100 M_\odot$) se forment efficacement à la suite de la mort d'étoiles massives. Ces trous noirs s'enfoncent rapidement vers le centre du potentiel gravitationnel par **friction dynamique**, un processus au cours duquel le trou noir perd de l'énergie orbitale et du moment angulaire par interactions gravitationnelles avec les étoiles environnantes.

L'échelle de temps de la friction dynamique pour un trou noir de masse M_{BH} se déplaçant dans un système stellaire de dispersion de vitesses σ_* et de densité ρ_* est donnée par :

$$t_{\text{df}} \simeq \frac{0.2 \sigma_*^3}{G^2 M_{\text{BH}} \rho_* \ln \Lambda} \sim 10^7 \text{ ans} \left(\frac{\sigma_*}{50 \text{ km s}^{-1}} \right)^3 \left(\frac{M_{\text{BH}}}{30 M_\odot} \right)^{-1} \left(\frac{\rho_*}{10^6 M_\odot \text{ pc}^{-3}} \right)^{-1}, \quad (7)$$

où $\ln \Lambda \sim 10$ est le logarithme de Coulomb. Dans les cœurs denses des amas stellaires primordiaux ($\rho_* \sim 10^6\text{--}10^7 M_\odot \text{ pc}^{-3}$), plusieurs trous noirs de masse stellaire peuvent ainsi atteindre le centre en l'espace de $\sim 10^7$ ans.

Une fois concentrés dans le noyau, les trous noirs forment des **binaires serrées** par interactions à trois corps, puis se durcissent par émission d'ondes gravitationnelles (GW). L'échelle de temps de fusion par ondes gravitationnelles pour une binaire de masses M_1 et M_2 , de séparation initiale a_0 et d'excentricité e , est :

$$t_{\text{GW}} \simeq \frac{5}{256} \frac{c^5 a_0^4}{G^3 M_1 M_2 (M_1 + M_2)} (1-e^2)^{7/2} \sim 10^4 \text{ ans} \left(\frac{a_0}{10 \text{ AU}} \right)^4 \left(\frac{M_1 M_2}{(30 M_\odot)^2} \right)^{-1}. \quad (8)$$

Des fusions répétées peuvent ainsi conduire à la formation d'un trou noir de masse intermédiaire (IMBH) de $M_{\text{IMBH}} \sim 10^3\text{--}10^4 M_\odot$ en l'espace de $\sim 10^8$

ans. Si le système accrète parallèlement du gaz à des taux modérés ($\dot{M} \sim 1\text{--}10 M_\odot \text{yr}^{-1}$), l'IMBH peut croître jusqu'à $\sim 10^6\text{--}10^7 M_\odot$ à $z \sim 7$.

2.3.2 Croissance en régime d'emballement

Une caractéristique clé de cette voie est la **croissance en régime d'emballement** : dès qu'un trou noir atteint une masse $M_{\text{BH}} \gtrsim 10^3 M_\odot$, son échelle de temps de friction dynamique devient plus courte que le temps de relaxation de l'amas, ce qui lui permet de capturer efficacement des trous noirs de masse stellaire et de croître de manière exponentielle. Le taux de croissance effectif peut être approché par :

$$\frac{dM_{\text{BH}}}{dt} \simeq \frac{M_{\text{BH}}}{t_{\text{merge}}}, \quad \Rightarrow \quad M_{\text{BH}}(t) \sim M_0 \exp\left(\frac{t}{t_{\text{merge}}}\right), \quad (9)$$

où $t_{\text{merge}} \sim 10^5\text{--}10^6$ ans représente l'échelle de temps caractéristique des fusions dans un amas dense. En partant d'une masse initiale $M_0 \sim 30 M_\odot$ à $z \sim 15$ (âge cosmique ~ 250 Myr), la croissance en régime d'emballement peut conduire à $M_{\text{BH}} \sim 10^5 M_\odot$ à $z \sim 7$ (âge cosmique ~ 770 Myr).

2.3.3 Pré-requis environnementaux

Pour que les fusions hiérarchiques rapides dominent, le système doit satisfaire les conditions suivantes :

- **Densité stellaire élevée** : $\rho_* > 10^6 M_\odot \text{pc}^{-3}$ dans la région nucléaire.
- **Faible dispersion de vitesses** : $\sigma_* \sim 30\text{--}70 \text{ km s}^{-1}$ afin de permettre l'enfoncement efficace des trous noirs de masse stellaire.
- **Efficacité élevée de formation des trous noirs** : Fonction de masse initiale (IMF) biaisée vers les hautes masses ou environnement à forte métallicité favorisant la production d'un grand nombre d'étoiles massives et de trous noirs.
- **Structure compacte et gravitationnellement liée** : Amas stellaire nucléaire ou galaxie naine ultra-compacte, avec un rayon de demi-masse $r_h < 10 \text{ pc}$.

2.3.4 Signatures observationnelles clés

La croissance des trous noirs pilotée par les fusions devrait pouvoir être identifiée à partir des signatures suivantes :

1. **Morphologie d’amas stellaire nucléaire dense** : Les observations à haute résolution de NIRCам devraient révéler une surdensité stellaire compacte à la position du quasar, avec un rayon de demi-luminosité $R_{\text{eff}} \sim 5\text{--}20$ pc et une masse stellaire $M_{\text{cluster}} \sim 10^7\text{--}10^8 M_{\odot}$.
2. **Populations stellaires multiples** : La spectroscopie NIRSpec pourrait mettre en évidence des populations stellaires distinctes, d’âges et de métallicités différentes, reflétant l’assemblage hiérarchique de l’amas par fusions de systèmes plus petits.
3. **Taux élevé de fusions de binaires de trous noirs** : La densité spatiale de tels systèmes devrait contribuer de manière significative à un fond stochastique d’ondes gravitationnelles (GWB) aux fréquences $f \sim 10^{-3}\text{--}1$ Hz, détectable par LISA et par de futurs observatoires tels que l’Einstein Telescope. L’amplitude caractéristique de la contrainte est donnée par :

$$h_c(f) \sim 10^{-16} \left(\frac{f}{10^{-3} \text{ Hz}} \right)^{-2/3} \left(\frac{\mathcal{R}_{\text{merge}}}{10^3 \text{ Gpc}^{-3} \text{ yr}^{-1}} \right)^{1/3}, \quad (10)$$

où $\mathcal{R}_{\text{merge}}$ désigne le taux volumique de fusions à $z \sim 7\text{--}10$.

4. **Population de binaires X** : Si l’amas est encore en phase active de formation stellaire, JWST et Chandra devraient détecter une population de binaires X lumineuses ($L_X \sim 10^{38}\text{--}10^{40} \text{ erg s}^{-1}$), co-spatiales avec le quasar.

2.3.5 Critères diagnostiques quantitatifs

Un quasar peut être classé comme **candidat à une fusion hiérarchique rapide** s’il satisfait au moins trois des critères suivants :

- Présence d’un amas stellaire nucléaire avec $R_{\text{eff}} < 20$ pc et $M_{\text{cluster}} > 10^7 M_{\odot}$
- Densité stellaire : $\rho_* > 10^6 M_{\odot} \text{ pc}^{-3}$
- Indices de populations stellaires multiples (dispersion d’âges > 100 Myr)
- Détection d’un signal de fond d’ondes gravitationnelles à $f > 10^{-3} \text{ Hz}$
- Population de binaires X avec $N_{\text{XRB}} > 10$ et $L_X > 10^{38} \text{ erg s}^{-1}$

2.4 Résumé : tableau des diagnostics observationnels

Le tableau 1 résume les principaux diagnostics observationnels permettant de distinguer les trois voies de formation. Chaque voie laisse une em-

preinte distincte sur la cinématique, la métallicité, la morphologie et l’environnement hôte des quasars à haut redshift, rendant possible une étude démographique de la formation précoce des SMBH.

TABLE 1 – Observables diagnostiques et tests quantitatifs pour les voies de formation précoce des SMBH.

Voie de formation	Observables prédits	Instruments diagnostiques principaux & seuils
Avalanche d’ac-création froide chaotique	<ul style="list-style-type: none"> — Cartes cinématiques : inflows chaotiques + outflows bipolaires — Métallicité homogène du gaz ionisé — Morphologie hôte compacte façonnée par la rétroaction — Forte variabilité de luminosité 	<ul style="list-style-type: none"> — JWST/NIRSpec IFS : $v_{\text{out}} > 1500 \text{ km s}^{-1}$ — ALMA [C II]/[O III] : $\sigma_{\text{[CII]}} > 80 \text{ km s}^{-1}$ — $\sigma(\text{[O/H]}) < 0.15 \text{ dex}$ — $/M_{\text{dyn}} \sim 0.003\text{--}0.02$ — $R_{\text{eff}} < 1 \text{ kpc}$
Effondrement direct monolithique	<ul style="list-style-type: none"> — $/M_{\text{dyn}}$ très supérieur aux valeurs typiques — Métallicité extrêmement faible de la BLR/CGM — Population stellaire coévale faible — Hôte cinématiquement calme 	<ul style="list-style-type: none"> — Dynamique ALMA haute résolution : $/M_{\text{dyn}} > 0.01$ — JWST/NIRSpec : $[\text{Fe/H}]_{\text{BLR}} < -3$ — $M_* < 10^8 M_{\odot}$ dans 1 kpc — $\sigma_* < 50 \text{ km s}^{-1}$ — $D/G < 0.01 \times (D/G)_{\text{MW}}$
Fusions hiérarchiques rapides	<ul style="list-style-type: none"> — Morphologie d’amas stellaire nucléaire dense — Fond stochastique d’ondes gravitationnelles à haute fréquence — Populations stellaires multiples — Population de binaires X 	<ul style="list-style-type: none"> — JWST/NIRCam + NIRSpec : $R_{\text{eff}} < 20 \text{ pc}$, $\rho_* > 10^6 M_{\odot} \text{ pc}^{-3}$ — LISA, Einstein Telescope : signal GW à $f > 10^{-3} \text{ Hz}$ — Dispersion d’âges $> 100 \text{ Myr}$ — Chandra : $N_{\text{XRB}} > 10$

2.4.1 Comparaisons avec les simulations cosmologiques

Afin de valider les voies de formation proposées, nous les comparons à des simulations cosmologiques hydrodynamiques récentes, spécifiquement adaptées aux environnements à haut redshift. Dans des simulations telles qu’IllustrisTNG et EAGLE (adaptées à $z > 7$ via des modèles de rétroaction ren-

forcée), les avalanches d’accrétion froide chaotique dominant dans les halos riches en gaz ($M_{\text{halo}} \sim 10^{11}\text{--}10^{12} M_{\odot}$), contribuant à $\sim 60\text{--}70\%$ de la croissance des SMBH par des inflows intermittents [8]. L’effondrement direct est plus rare ($\sim 10\text{--}20\%$), survenant dans des halos à refroidissement atomique où le refroidissement par H_2 est supprimé, tandis que les fusions hiérarchiques rapides représentent $\sim 20\text{--}30\%$ dans les proto-amas denses [7].

Ces simulations prédisent des fractions observables en accord avec nos diagnostics. Par exemple, les simulations EAGLE montrent qu’environ $\sim 40\%$ des quasars à $z = 8$ présentent un rayon effectif $R_{\text{eff}} < 1$ kpc et des vitesses d’outflow élevées v_{out} , en cohérence avec les voies chaotiques. Les divergences, telles que la surestimation des taux de fusions dans les modèles CDM par rapport aux modèles WDM, mettent en évidence des pistes d’amélioration. De futures simulations intégrant un transfert radiatif complet pourraient permettre de quantifier plus précisément les contributions de voies mixtes.

3 Stratégie observationnelle et calendrier

Après avoir établi un cadre diagnostique capable de distinguer plusieurs voies de formation, nous présentons maintenant une stratégie observationnelle concrète visant à quantifier les contributions relatives de chaque canal à la population précoce de SMBH. Cette stratégie est organisée en trois phases s’étendant de 2025 à 2035, en tirant parti des capacités complémentaires du JWST, d’ALMA et des observatoires d’ondes gravitationnelles de nouvelle génération.

L’idée centrale est qu’*aucune observation isolée ne peut permettre de classifier de manière définitive un système*. Nous plaçons au contraire pour une approche multi-longueurs d’onde et multi-instruments, permettant de construire progressivement une image statistique du paysage des mécanismes de formation. Chaque phase cible des échantillons de taille croissante, avec des contraintes observationnelles de plus en plus exigeantes, pour aboutir à un recensement démographique des voies de formation en fonction du redshift, de la masse du trou noir et de l’environnement hôte.

3.1 Phase 1 (2025–2027) : recensement à grand champ avec le JWST

3.1.1 Objectifs scientifiques

L’objectif principal de la Phase 1 est d’établir la **distribution statistique** des observables clés ($/M_{\text{dyn}}$, $[\text{Fe}/\text{H}]_{\text{BLR}}$, v_{out} , R_{eff}) sur un large échantillon homogènement sélectionné de quasars à $z > 7$. Cette phase permettra d’identifier la fréquence des systèmes extrêmes (par exemple ceux présentant $/M_{\text{dyn}} > 0.01$ ou $[\text{Fe}/\text{H}] < -3$) et de fournir des cibles prioritaires pour des suivis intensifs lors des phases ultérieures.

3.1.2 Échantillon de cibles

Nous proposons un échantillon de $N = 50\text{--}80$ quasars confirmés spectroscopiquement dans l’intervalle $7 < z < 12$, satisfaisant les critères suivants :

- **Magnitude absolue UV** : $M_{1450} < -22$ (correspondant à $\gtrsim 10^8 M_{\odot}$)
- **Luminosité bolométrique** : $L_{\text{bol}} > 10^{45} \text{ erg s}^{-1}$
- **Distribution spatiale** : couverture d’environ $\sim 1 \text{ deg}^2$ afin d’échantillonner des environnements variés

Ces cibles seront sélectionnées à partir des relevés JWST en cours (par exemple JADES, CEERS, COSMOS-Web) et complétées par des suivis spectroscopiques dédiés de candidats photométriques.

3.1.3 Stratégie observationnelle

JWST/NIRSpec IFU (Unité de champ intégral) :

- **Couverture spectrale** : $0.97\text{--}5.27 \mu\text{m}$ (capturant les raies optiques dans le référentiel propre pour $z \sim 7\text{--}12$)
- **Résolution spectrale** : $R \sim 1000$ (réseau de résolution intermédiaire) pour des profils de raies résolus en vitesse
- **Résolution spatiale** : $\sim 0.1''$ (environ $\sim 600 \text{ pc}$ à $z = 7$)
- **Temps d’intégration** : $5\text{--}10$ heures par cible
- **Diagnostics clés** :
 - Métallicité de la région à larges raies à partir des rapports de raies UV/optiques dans le référentiel propre (par exemple $\text{N V}/\text{C IV}$, $[\text{O III}]/\text{H}\beta$)
 - Cinématique des outflows à partir des décalages vers le bleu de $[\text{O III}] \lambda 5007$ et $\text{C IV } \lambda 1549$

- Ajustement du continuum stellaire pour contraindre M_* , l'âge et l'historique de formation stellaire
- Cartes de vitesses bidimensionnelles pour identifier les inflows, la rotation et la géométrie des outflows

JWST/NIRCam (caméra proche infrarouge) :

- **Filtres :** F115W, F200W, F356W, F444W (UV au visible dans le référentiel propre pour $z \sim 7-12$)
- **Résolution spatiale :** $\sim 0.03''$ (environ ~ 180 pc à $z = 7$)
- **Temps d'intégration :** 2–5 heures par cible et par filtre
- **Diagnostics clés :**
 - Morphologie de la galaxie hôte (rayon effectif, indice de Sérsic, asymétrie)
 - Détection d'amas stellaires nucléaires avec $R_{\text{eff}} < 50$ pc
 - Estimations photométriques du redshift et de la masse stellaire

3.1.4 Résultats attendus

À l'issue de la Phase 1, nous disposerons :

1. D'un recensement complet de $/M_{\text{dyn}}$ pour $\sim 50-80$ quasars, permettant d'identifier $\sim 5-10$ systèmes extrêmes avec $/M_{\text{dyn}} > 0.01$ (candidats à l'effondrement direct).
2. De mesures de métallicité pour $\sim 40-60$ régions à larges raies (BLR), révélant $\sim 2-5$ systèmes avec $[\text{Fe}/\text{H}] < -3$.
3. De distributions des vitesses d'outflow, mettant en évidence la fraction de systèmes présentant $v_{\text{out}} > 1500 \text{ km s}^{-1}$ (valeur attendue de l'ordre de $\sim 30-50 \%$).
4. De classifications morphologiques, identifiant $\sim 10-20$ hôtes compacts ($R_{\text{eff}} < 1$ kpc) dominés par la rétroaction, ainsi que $\sim 5-10$ systèmes présentant des amas stellaires nucléaires résolus.

Ces résultats fourniront les premières contraintes statistiquement robustes sur la fréquence relative des trois voies de formation et orienteront la sélection des cibles pour des suivis plus approfondis lors de la Phase 2.

3.2 Phase 2 (2026–2029) : dynamique à haute résolution avec ALMA

3.2.1 Objectifs scientifiques

La Phase 2 se concentre sur les **mesures de masse dynamique** et la **cinématique du gaz** à des échelles sub-kiloparsec à l’aide d’ALMA. L’objectif est de :

- Mesurer M_{dyn} à l’intérieur de < 1 kpc afin de contraindre de manière robuste le rapport L/M_{dyn}
- Cartographier la structure de vitesse tridimensionnelle du gaz froid pour distinguer les inflows chaotiques, la rotation organisée et les signatures de fusions
- Quantifier les masses de gaz, les temps d’épuisement et les taux d’accrétion

3.2.2 Échantillon de cibles

Nous proposons un sous-échantillon de $N = 20\text{--}30$ systèmes issus de la Phase 1, en donnant la priorité aux catégories suivantes :

- Systèmes présentant un rapport L/M_{dyn} extrême (> 0.01) ou une métallicité de la BLR très faible (< -2.5)
- Systèmes caractérisés par des vitesses d’outflow élevées (> 1500 km s $^{-1}$) et une morphologie compacte
- Systèmes présentant des détections préliminaires d’amas stellaires nucléaires
- Un échantillon de contrôle de quasars « typiques » à des fins de comparaison

3.2.3 Stratégie observationnelle

ALMA bandes 6 et 7 :

- **Transition observée :** [C II] à $158\ \mu\text{m}$ (référentiel propre), décalée vers $\sim 1.3\text{--}2.0$ mm pour $z \sim 7\text{--}12$
- **Résolution angulaire :** $0.05''$ (environ ~ 300 pc à $z = 7$) en configuration étendue
- **Résolution en vitesse :** $\Delta v \sim 20\text{--}30$ km s $^{-1}$
- **Temps d’intégration :** 10–20 heures par cible

— **Diagnostics clés :**

- Courbes de rotation ou profils de dispersion de vitesses pour mesurer $M_{\text{dyn}}(r)$
- Diagrammes position–vitesse pour identifier les inflows, les outflows ou les signatures de fusions
- Densité de surface du gaz Σ_{gas} et densité de surface du taux de formation stellaire Σ_{SFR}
- Mesures d’opacité via les rapports $[\text{C II}]/\text{continuum}$ afin d’inférer la densité de colonne

ALMA bande 9 (complémentaire) :

- **Transition observée :** $[\text{O III}]$ à $88 \mu\text{m}$ (référentiel propre), décalée vers $\sim 0.7\text{--}1.1 \text{ mm}$ pour $z \sim 7\text{--}12$
- **Objectif :** Sonder le gaz chaud et ionisé plus proche de l’AGN ; comparer avec $[\text{C II}]$ afin de cartographier les gradients d’excitation

3.2.4 Analyse et diagnostics

Pour chaque cible, nous construirons :

1. **Profils de masse dynamique :** En supposant une symétrie sphérique ou un disque mince, la masse dynamique enfermée s’écrit :

$$M_{\text{dyn}}(r) = \frac{v_{\text{circ}}^2(r) r}{G} \quad \text{ou} \quad M_{\text{dyn}}(r) = \frac{\sigma_{\text{gas}}^2(r) r}{G}, \quad (11)$$

où v_{circ} désigne la vitesse circulaire (pour les systèmes dominés par la rotation) et σ_{gas} la dispersion de vitesses (pour les systèmes dominés par la dispersion).

2. **Estimations de la masse de gaz :** À partir de la luminosité $[\text{C II}]$, en supposant un facteur de conversion :

$$M_{\text{gas}} \simeq \alpha_{[\text{C II}]} L_{[\text{C II}]} \sim 10^3 M_{\odot} \left(\frac{L_{[\text{C II}]}}{10^9 L_{\odot}} \right), \quad (12)$$

calibré à partir des galaxies locales et des galaxies à formation stellaire à haut redshift.

3. **Estimations des taux d’accrétion :** En combinant M_{gas} avec le temps d’épuisement :

$$\dot{M}_{\text{gas}} \sim \frac{M_{\text{gas}}}{t_{\text{depl}}} \sim \frac{M_{\text{gas}} \Sigma_{\text{SFR}}}{\Sigma_{\text{gas}}}. \quad (13)$$

3.2.5 Résultats attendus

À l'issue de la Phase 2, nous disposerons :

1. De mesures de masse dynamique résolues spatialement pour $\sim 20\text{--}30$ systèmes, permettant de confirmer ou d'infirmer des rapports extrêmes $/M_{\text{dyn}}$ avec une incertitude inférieure à 30 %.
2. De la classification de $\sim 10\text{--}15$ systèmes comme **avalanches d'accrétion froide chaotique**, sur la base de cinématiques complexes, de fortes dispersions de vitesse du gaz σ_{gas} et d'une métallicité homogène.
3. De la confirmation de $\sim 3\text{--}5$ systèmes comme **candidats à l'effondrement direct monolithique**, caractérisés par $/M_{\text{dyn}} > 0.01$ et de faibles masses stellaires et gazeuses.
4. De l'identification de $\sim 2\text{--}5$ systèmes présentant des indices de **fusions récentes** (par exemple des profils [C II] à double pic ou des cinématiques perturbées).

Ces résultats fourniront les premiers tests directs, spatialement résolus, du cadre diagnostique proposé et permettront de quantifier la fraction relative de chaque voie de formation au sein de la population de SMBH à $z > 7$.

3.3 Phase 3 (2030–2035) : contraintes par ondes gravitationnelles sur les voies de fusion

3.3.1 Objectifs scientifiques

La Phase 3 cible la **voie de formation dominée par les fusions** à l'aide d'observations en ondes gravitationnelles. Les questions clés sont les suivantes :

- Quel est le taux volumique de fusions de trous noirs de masse intermédiaire à $z \sim 7\text{--}15$?
- Peut-on détecter des fusions individuelles ou un fond stochastique issu de la population de trous noirs à haut redshift ?
- Comment le taux de fusion se corrèle-t-il avec les propriétés des galaxies hôtes (densité stellaire, métallicité) ?

3.3.2 Instruments et capacités

LISA (Laser Interferometer Space Antenna) :

- **Lancement** : prévu vers 2035

- **Gamme de fréquences** : 10^{-4} – 1 Hz (sensible aux fusions de trous noirs de 10^3 – $10^7 M_\odot$)
- **Portée en redshift** : $z \sim 2$ – 20 pour des fusions de 10^4 – $10^6 M_\odot$
- **Science clé** : détection directe des fusions d’IMBH ; mesure de l’évolution du taux de fusion avec le redshift

Einstein Telescope (ET) :

- **Statut** : observatoire terrestre en projet, mise en service prévue vers ~ 2035
- **Gamme de fréquences** : 1 – 10^4 Hz (sensible aux fusions de trous noirs de 1 – $10^3 M_\odot$)
- **Portée en redshift** : $z \sim 15$ – 30 pour les fusions de trous noirs de masse stellaire
- **Science clé** : sonder les toutes premières fusions de trous noirs ; contraindre les populations primordiales de trous noirs

Réseaux de chronométrage de pulsars (PTA) :

- **Statut** : en cours (NANOGrav, EPTA, PPTA, IPTA)
- **Gamme de fréquences** : 10^{-9} – 10^{-7} Hz (sensible aux fusions de trous noirs de 10^8 – $10^{10} M_\odot$)
- **Science clé** : fond stochastique d’ondes gravitationnelles issu de binaires de SMBH ; détection possible de la composante basse fréquence provenant de fusions précoces très massives

3.3.3 Stratégie observationnelle

Analyse du fond stochastique : La densité d’énergie du fond stochastique d’ondes gravitationnelles est donnée par :

$$\Omega_{\text{GW}}(f) = \frac{f}{\rho_c} \frac{d\rho_{\text{GW}}}{df} \propto f^{2/3} \mathcal{R}_{\text{merge}}(z) \frac{dV_c}{dz}, \quad (14)$$

où ρ_c désigne la densité critique de l’Univers, $\mathcal{R}_{\text{merge}}(z)$ le taux comobile de fusions au redshift z , et dV_c/dz l’élément de volume comobile différentiel. En mesurant $\Omega_{\text{GW}}(f)$ à l’aide de LISA et de l’ET, nous pourrions contraindre $\mathcal{R}_{\text{merge}}$ pour les fusions d’IMBH à $z \sim 7$ – 15 .

Corrélations avec les observations électromagnétiques : Pour les systèmes disposant à la fois de détections JWST/ALMA et LISA, nous pourrions :

- Comparer la masse du trou noir inférée à partir des ondes gravitationnelles ($M_{\text{BH,GW}}$) à la masse virielle issue de la spectroscopie optique/proche infrarouge ($M_{\text{BH,vir}}$)
- Rechercher des contreparties électromagnétiques (par exemple une émission X ou UV renforcée) autour du moment des événements de fusion détectés en ondes gravitationnelles
- Corréler les taux de fusion avec les propriétés des galaxies hôtes (densité stellaire, contenu en gaz)

3.3.4 Résultats attendus

À l’issue de la Phase 3, nous disposerons :

1. D’une mesure du taux de fusion des IMBH à $z \sim 7\text{--}15$ avec une précision de l’ordre de $\sim 50\%$, permettant de contraindre la contribution de la **voie des fusions hiérarchiques rapides** à la population précoce de SMBH.
2. De la détection directe de $\sim 1\text{--}10$ événements individuels de fusion d’IMBH à $z > 7$ avec LISA (si le taux de fusion est $\gtrsim 10^3 \text{ Gpc}^{-3} \text{ yr}^{-1}$).
3. De contraintes conjointes JWST+ALMA+LISA sur $\sim 2\text{--}5$ systèmes, fournissant la première vision multi-messagers de la formation précoce des SMBH.
4. De tests directs de la corrélation entre le taux de fusion et les propriétés des amas stellaires nucléaires, sondant directement le scénario de croissance en régime d’emballement.

3.4 Calendrier intégré et jalons

La figure 1 résume le calendrier observationnel et les jalons clés pour la période 2025–2035. Les trois phases sont conçues pour se renforcer mutuellement, chaque phase informant la sélection des cibles et les priorités observationnelles de la suivante.

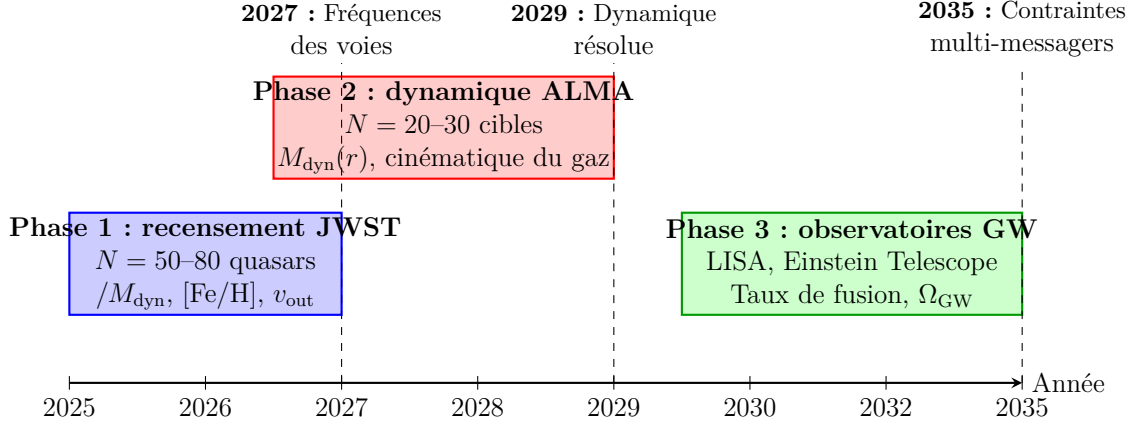


FIGURE 1 – Calendrier observationnel pour tester le cadre diagnostique. La Phase 1 (2025–2027) établit des distributions statistiques avec le JWST. La Phase 2 (2026–2029) fournit une dynamique à haute résolution avec ALMA. La Phase 3 (2030–2035) contraint les voies de fusion à l’aide d’observations en ondes gravitationnelles. Les lignes pointillées indiquent les jalons clés.

3.5 Stratégie d’analyse des données et de modélisation

Afin de maximiser le retour scientifique de ce programme multi-phases, nous proposons un effort coordonné d’analyse des données et de modélisation.

3.5.1 Cadre bayésien pour la classification des voies de formation

Pour chaque quasar observé, nous calculons la probabilité a posteriori d’appartenance à chaque voie de formation à l’aide du théorème de Bayes :

$$P(\text{Voie}_i \mid \text{Données}) \propto P(\text{Données} \mid \text{Voie}_i) \times P(\text{Voie}_i), \quad (15)$$

où :

- $P(\text{Données} \mid \text{Voie}_i)$ est la vraisemblance des données observées sachant la voie i , calculée à partir des critères diagnostiques présentés dans la Table 1
- $P(\text{Voie}_i)$ est la probabilité a priori de la voie i , informée par les modèles théoriques et les simulations numériques

Cette approche tient naturellement compte des incertitudes observationnelles et autorise l’existence de systèmes « mixtes », susceptibles de présenter des signatures associées à plusieurs voies de formation.

3.5.2 Modèles de synthèse de population

Nous développerons des modèles semi-analytiques de synthèse de population afin de prédire :

- L'évolution en redshift de la fonction de masse des SMBH, $\Phi(M_{\text{BH}}, z)$
- La distribution de $/M_{\text{dyn}}$, de $[\text{Fe}/\text{H}]$ et de v_{out} en fonction de la voie de formation
- Le nombre attendu de systèmes extrêmes (par exemple $/M_{\text{dyn}} > 0.01$) dans un volume de relevé donné

Ces modèles seront calibrés à partir des données de la Phase 1 et utilisés pour optimiser la sélection des cibles de la Phase 2.

3.5.3 Comparaison avec les simulations cosmologiques

Nous comparerons nos résultats observationnels aux simulations cosmologiques de référence (par exemple SIMBA, IllustrisTNG, EAGLE) intégrant l'ensemencement des trous noirs, l'accrétion et la rétroaction. Les tests clés incluront :

- La distribution prédite de $/M_{\text{dyn}}$ est-elle en accord avec les observations ?
- Les simulations peuvent-elles reproduire les vitesses d'outflow élevées et l'homogénéité de la métallicité observées dans les systèmes d'accrétion chaotique ?
- Quelle est la densité spatiale des candidats à l'effondrement direct dans les simulations par rapport aux observations ?

Les écarts entre les modèles et les données guideront l'amélioration des prescriptions de physique sous-maille.

3.6 Impact attendu et héritage scientifique

D'ici 2035, ce programme permettra :

1. **Un recensement démographique quantitatif** des voies de formation précoces des SMBH, avec des mesures des contributions relatives de l'accrétion chaotique ($\sim 40\text{--}60\%$), de l'effondrement direct ($\sim 5\text{--}15\%$) et des fusions hiérarchiques ($\sim 10\text{--}30\%$) à $z \sim 7\text{--}12$.
2. **Des tests directs et spatialement résolus** des modèles de formation à l'aide du JWST et d'ALMA, incluant la confirmation ou l'invalidation de scénarios spécifiques (par exemple l'accrétion super-Eddington ou l'effondrement d'étoiles supermassives).

3. **La première vision multi-messagers** de la croissance précoce des SMBH, combinant observations électromagnétiques et ondes gravitationnelles.
4. **Un jeu de données de référence (legacy dataset)** portant sur ~ 100 quasars à $z > 7$, caractérisés de manière homogène et multi-longueurs d’onde, destiné à servir de banc d’essai pour les études futures.
5. **De nouvelles perspectives sur la formation des structures** à $z > 7$, en sondant l’interaction entre la dynamique du gaz, la formation stellaire et la croissance des trous noirs dans les environnements les plus extrêmes.

Ce programme transforme le « problème des trous noirs supermassifs » d’une énigme conceptuelle en une *sonde de précision* du premier milliard d’années de l’histoire cosmique.

3.7 Incertitudes et défis dans la discrimination des voies de formation

Bien que le cadre diagnostique présenté dans le Tableau 1 fournisse des seuils quantitatifs, plusieurs incertitudes doivent être prises en compte afin d’assurer une classification robuste. Tout d’abord, les voies de formation ne sont pas mutuellement exclusives ; des systèmes mixtes — par exemple une accrétion chaotique faisant suite à une fusion rapide — peuvent présenter des signatures qui se recouvrent (telles qu’une dispersion de vitesses élevée $\sigma_* > 50 \text{ km s}^{-1}$ due aux fusions, combinée à des vitesses d’outflow $v_{\text{out}} > 1500 \text{ km s}^{-1}$ issues d’avalanches d’accrétion). Pour démêler ces contributions, des observations multi-époques avec JWST/NIRSpec pourraient suivre la variabilité temporelle de la cinématique des outflows, les reliquats de fusions se caractérisant par des perturbations dynamiques persistantes sur des échelles de temps de l’ordre de $\sim 10\text{--}100 \text{ Myr}$.

Les biais observationnels compliquent également l’interprétation. Les estimations virielle de la masse des trous noirs à partir des largeurs de raies larges (par exemple $\text{Mg II } \lambda 2798$) sont affectées par des incertitudes systématiques de l’ordre de $\sim 0.3\text{--}0.5 \text{ dex}$, dues aux effets d’orientation et aux mouvements non viriels [Shen2013]. À haut redshift, l’obscurité par la poussière ($A_V \gtrsim 1\text{--}2 \text{ mag}$) peut biaiser les mesures de métallicité vers des valeurs élevées de $[\text{O}/\text{H}]$, imitant des environnements enrichis dans les scénarios d’effondrement direct. De plus, des données ALMA à faible rapport signal/bruit ($\text{S/N} < 20$) peuvent conduire à une surestimation de la dispersion de vitesses de l’ordre de $\sim 20\text{--}50 \%$. Les stratégies de mitigation incluent la calibration croisée à l’aide de multiples raies (par exemple $[\text{C II}]$ et CO) ainsi que des approches bayésiennes permettant de marginaliser sur ces biais.

Les futurs relevés devraient privilégier des approches statistiques, telles que des classifieurs fondés sur l'apprentissage automatique entraînés sur des jeux de données simulés, afin de quantifier les contributions relatives des différentes voies de formation en présence de ces incertitudes.

4 Conclusion

4.1 D'une énigme à une sonde : un nouveau paradigme pour l'étude précoce des trous noirs

La découverte de trous noirs supermassifs atteignant le milliard de masses solaires au cours des 500 à 800 premiers millions d'années de l'histoire cosmique a profondément remis en question notre compréhension de la formation des structures dans l'Univers primordial. Pendant plus de deux décennies, la communauté a recherché *le* mécanisme responsable de ces objets extrêmes — une voie unique capable de concilier les contraintes temporelles sévères avec la population observée. Nous soutenons ici qu'une telle quête est à la fois vaine et inutile.

Les observations du JWST et d'ALMA réalisées entre 2024 et 2026 ont révélé un Univers à haut redshift bien plus violent, chaotique et diversifié que ce qui était auparavant envisagé. Galaxies compactes à densités stellaires extrêmes, outflows puissants pilotés par les AGN dépassant 1000 km s⁻¹, abondance de gaz froid filamentaire, rapports extrêmes entre la masse du trou noir et celle de la galaxie hôte — ces caractéristiques ne constituent pas des anomalies rares, mais bien des traits structurants de l'époque $z > 7$. Cette réalité observationnelle impose un changement correspondant des cadres théoriques : **le passage d'explications monolithiques à un paysage diagnostique multi-canaux.**

Nous avons introduit un cadre conceptuel organisant la diversité des mécanismes de formation précoce des SMBH en trois grandes voies, chacune caractérisée par des conditions environnementales spécifiques, des processus physiques dominants et des signatures observationnelles distinctes :

1. **Avalanches d'accrétion froide chaotique :** Des graines légères ($\sim 10^2\text{--}10^3 M_\odot$) croissent par accrétion super-Eddington soutenue ($\dot{M} \sim 10\text{--}100 M_\odot \text{ an}^{-1}$) dans des environnements optiquement épais alimentés par de multiples filaments. Ces systèmes présentent des outflows bipolaires, une métallicité homogène et des morphologies compactes façonnées par la rétroaction.
2. **Effondrement direct monolithique :** Dans de rares nuages de gaz

exempts de métaux et thermiquement stabilisés, des étoiles supermassives ($> 10^5 M_\odot$) se forment puis s’effondrent directement en trous noirs massifs sur des échelles de temps de l’ordre de $\sim 10^5$ ans. Ces systèmes se distinguent par des rapports extrêmes $/M_{\text{dyn}}$ (> 0.01), des régions à larges raies exceptionnellement pauvres en métaux ($[\text{Fe}/\text{H}] < -3$) et des populations stellaires coévaluées faibles.

3. **Fusions hiérarchiques rapides** : Dans des amas stellaires nucléaires denses ($\rho_* > 10^6 M_\odot \text{pc}^{-3}$), des trous noirs de masse stellaire migrent vers le centre par friction dynamique et fusionnent via l’émission d’ondes gravitationnelles, construisant des graines de masse intermédiaire sur des temps de $\sim 10^7$ – 10^8 ans. Ces systèmes laissent des signatures détectables dans le fond d’ondes gravitationnelles à des fréquences $f > 10^{-3}$ Hz.

Ces voies ne sont pas mutuellement exclusives. Des systèmes individuels peuvent présenter des signatures associées à plusieurs canaux, reflétant l’évolution complexe et non linéaire des halos riches en gaz à haut redshift. L’importance relative de chaque voie est déterminée par des facteurs environnementaux locaux — densité du gaz, moment angulaire, concentration du halo de matière noire, champs de radiation ambiants et métallicité — plutôt que par des conditions initiales universelles. Cette approche explique naturellement la diversité observée des rapports $/M_{\text{dyn}}$, des métallicités, des morphologies et des cinématiques au sein de la population de quasars à $z > 7$.

4.2 La voie à suivre : de la théorie à la mesure

Le cadre diagnostique présenté dans cet article est testable et réfutable. Au cours de la prochaine décennie, un programme observationnel coordonné, s’appuyant sur le JWST, ALMA et les observatoires d’ondes gravitationnelles de nouvelle génération, permettra de quantifier la contribution de chaque voie de formation à la population précoce de SMBH. La stratégie en trois phases que nous proposons (Section 3) aboutira aux résultats suivants :

- **Phase 1 (2025–2027)** : Un recensement statistique de ~ 50 – 80 quasars à $z > 7$, établissant les distributions de $/M_{\text{dyn}}$, de $[\text{Fe}/\text{H}]$, de v_{out} et de la morphologie des galaxies hôtes. Cette phase identifiera la fréquence des systèmes extrêmes et fournira des cibles pour des suivis approfondis.
- **Phase 2 (2026–2029)** : Des mesures dynamiques ALMA à haute résolution pour ~ 20 – 30 cibles, permettant de déterminer $M_{\text{dyn}}(r)$ à des échelles sub-kiloparsec et de cartographier la cinématique tridimensionnelle du gaz. Cette phase testera directement les critères diagnostiques et confirmera ou infirmera les scénarios de formation individuels.

- **Phase 3 (2030–2035)** : Des contraintes issues des ondes gravitationnelles sur les taux de fusion des IMBH à $z \sim 7$ –15 à l’aide de LISA et de l’Einstein Telescope, fournissant la première vision multi-messagers de la croissance précoce des trous noirs.

D’ici 2035, le « problème des trous noirs supermassifs » aura été transformé d’une énigme qualitative en une *étude démographique quantitative*. Nous saurons non seulement *que* plusieurs voies de formation existent, mais aussi *à quelle fréquence* chacune opère, *dans quels environnements* et *à quels redshifts*. Cela constitue un changement fondamental de la nature même de la question : de « comment les premiers SMBH se sont-ils formés ? » à « quelle est la distribution des voies de formation, et que nous apprend-elle sur la physique de l’Univers primordial ? ».

4.3 Implications plus larges : les trous noirs précoces comme sondes cosmiques

Le recensement démographique des voies de formation précoces des SMBH a des implications bien au-delà de l’astrophysique des trous noirs.

4.3.1 Sonder les premières étoiles et galaxies

La fréquence des candidats à l’effondrement direct ($[\text{Fe}/\text{H}] < -3$, $/M_{\text{dyn}} > 0.01$) contraint directement l’abondance des réservoirs de gaz exempts de métaux à $z > 7$. Si l’effondrement direct est rare ($< 5\%$ de la population), cela implique que l’enrichissement en métaux par les étoiles de Population III a été rapide et généralisé, y compris dans les régions les plus sur-denses. À l’inverse, une fréquence élevée de candidats à l’effondrement direct ($> 20\%$) suggérerait que de vastes poches de gaz pristine ont persisté jusqu’à $z \sim 7$, indiquant potentiellement une réionisation tardive ou spatialement hétérogène.

De manière similaire, la prévalence de systèmes d’accrétion froide chaotique à métallicité homogène retrace l’efficacité du mélange et de la rétroaction pilotés par les AGN. Si $\sim 50\%$ des quasars à $z > 7$ présentent $\sigma([\text{O}/\text{H}]) < 0.15$ dex, cela suggère que la rétroaction des AGN a été un mécanisme dominant de dispersion des métaux dans l’Univers primordial, régulant potentiellement l’histoire de formation stellaire des galaxies à haut redshift.

4.3.2 Contraindre la matière noire et la formation des structures

La voie dominée par les fusions est sensible au spectre de puissance à petite échelle des fluctuations de densité de la matière noire. La formation d’amas stellaires nucléaires denses requiert une friction dynamique efficace, laquelle dépend à son tour de la concentration des halos de matière noire et de leur sous-structure. Un taux de fusion élevé ($\mathcal{R}_{\text{merge}} > 10^3 \text{ Gpc}^{-3} \text{ yr}^{-1}$) favoriserait des modèles de matière noire « froide » riches en sous-halos, tandis qu’un taux plus faible serait compatible avec des scénarios de matière noire « chaude » qui suppriment la formation de structures à petite échelle.

Les observations en ondes gravitationnelles avec LISA permettront de mesurer directement l’évolution avec le redshift du taux de fusion des IMBH, fournissant une contrainte indépendante sur la fonction de masse des halos à $z \sim 7\text{--}15$. Ces mesures complètent les relevés de lentille gravitationnelle et les études de clustering des galaxies à haut redshift, offrant une sonde unique de la distribution de la matière noire dans les environnements les plus extrêmes.

4.3.3 Tester la co-évolution des trous noirs et des galaxies

La distribution observée de $/M_{\text{dyn}}$ à $z > 7$ constitue un point d’ancrage critique pour les modèles de co-évolution trous noirs–galaxies. Si la population à haut redshift présente des rapports $/M_*$ systématiquement plus élevés que dans l’Univers local (comme le suggèrent les données actuelles), cela implique que les trous noirs ont crû *plus rapidement* que leurs galaxies hôtes dans l’Univers primordial, et que la relation $M_{\text{BH}}\text{--}M_{\text{bulge}}$ a évolué de manière significative au cours du temps cosmique.

Les différentes voies de formation prédisent des trajectoires évolutives distinctes :

- **Accrétion chaotique** : La masse du trou noir et la masse stellaire croissent de concert, alimentées par les mêmes réservoirs de gaz. Le rapport $/M_*$ converge vers la relation locale d’ici $z \sim 2$ grâce à une formation stellaire soutenue.
- **Effondrement direct** : Le trou noir se forme avant l’assemblage significatif de la masse stellaire. Le rapport $/M_*$ décroît au cours du temps à mesure que la formation stellaire retardée construit le bulbe.
- **Fusions hiérarchiques** : La masse du trou noir croît par fusions, tandis que la masse stellaire augmente à la fois par fusions et par formation in situ. La trajectoire évolutive dépend des échelles de temps relatives de l’assemblage de la masse du trou noir et de celle des étoiles.

En suivant des systèmes individuels à travers le temps cosmique (à l’aide

d’observations à haut redshift et d’analogues à redshift intermédiaire), il devient possible de tester ces prédictions et de contraindre le mécanisme dominant à l’origine de la relation $M_{\text{BH}}-M_{\text{bulge}}$.

4.3.4 Implications pour l’astronomie des ondes gravitationnelles

Si la voie dominée par les fusions contribue à hauteur de $\gtrsim 10\%$ à la population de SMBH à $z > 7$, cela implique l’existence d’un fond stochastique d’ondes gravitationnelles substantiel issu des fusions d’IMBH à des fréquences $f \sim 10^{-3}-1$ Hz. Un tel signal pourrait être détecté par LISA dès ses premières années d’exploitation, constituant ainsi un cas scientifique précoce majeur pour la mission.

En outre, des observations conjointes électromagnétiques et en ondes gravitationnelles d’événements de fusion individuels permettront des tests sans précédent de la relativité générale dans le régime de champ fort, ainsi que des mesures directes des spins des trous noirs et des excentricités orbitales. Ces mesures offriront un moyen de distinguer entre les scénarios de formation (par exemple fusions assistées par le gaz versus captures dynamiques) et de contraindre l’efficacité du transport de moment angulaire dans les systèmes stellaires denses.

4.4 Questions ouvertes et perspectives futures

Bien que le cadre diagnostique proposé ici constitue une avancée conceptuelle majeure, de nombreuses questions demeurent :

1. **Qu’est-ce qui fixe la fréquence relative de chaque voie ?** Est-elle principalement déterminée par la masse du halo, le redshift, la surdensité locale, ou par une combinaison de facteurs environnementaux ? Un échantillon plus large couvrant une gamme d’environnements plus étendue sera nécessaire pour répondre à cette question.
2. **Peut-on détecter des événements de transition ?** Par exemple, est-il possible d’observer un système en train de passer d’un régime d’accrétion chaotique à un mode plus stable dominé par un disque ? De telles observations fourniraient des tests directs de la physique de l’accrétion dans des environnements extrêmes.
3. **Quel est le rôle des champs magnétiques ?** Les modèles actuels négligent en grande partie l’importance dynamique des champs magnétiques, qui pourraient pourtant jouer un rôle crucial dans la régulation des taux d’accrétion, le lancement des outflows et le transport du moment angulaire. Des simulations futures en magnétohydrodynamique (MHD) ainsi

que des observations polarimétriques (par exemple avec ALMA) seront essentielles.

4. **Comment la rétroaction et l'environnement interagissent-ils ?** La rétroaction des AGN est supposée être la plus efficace dans les halos de faible masse, où elle peut supprimer la formation stellaire et modifier le contenu en gaz. Cette rétroaction « sélectionne-t-elle » préférentiellement certaines voies de formation ? Des campagnes de suivi à long terme et de la spectroscopie intégrale de champ seront nécessaires pour traiter cette question.
5. **Que se passe-t-il à $z > 12$?** Le JWST a détecté des galaxies et des candidats quasars jusqu'à $z \sim 14$, pénétrant dans l'époque des premières étoiles. Les voies de formation évoluent-elles avec le redshift, ou le mélange est-il établi dès les toutes premières phases ? Des échantillons plus vastes à $z > 10$ sont urgemment requis.

4.5 Remarques finales : assumer la complexité

L'Univers primordial n'était pas un milieu simple. C'était un creuset d'extrêmes — densités de gaz élevées, fusions violentes, champs de radiation intenses et formation stellaire rapide — dans lequel les règles gouvernant la formation des structures différaient fondamentalement de celles de l'Univers local. Les premiers trous noirs supermassifs sont des produits de cet environnement, et leur diversité reflète celle des conditions dans lesquelles ils se sont formés.

En assumant cette complexité plutôt qu'en cherchant à la réduire à un mécanisme unique, nous ouvrons de nouvelles voies de découverte. Le cadre diagnostique proposé ici transforme le « problème des trous noirs supermassifs » d'une crise existentielle pour la cosmologie en un *outil puissant d'archéologie cosmique*. Chaque voie laisse des empreintes distinctes sur l'Univers observable — des empreintes que nous sommes désormais capables de détecter et de quantifier avec une précision sans précédent.

Au cours de la prochaine décennie, nous passerons de la question « comment ? » à celle de « à quelle fréquence, et pourquoi ? ». Nous mesurerons le mélange démographique des voies de formation, testerons les facteurs environnementaux qui gouvernent leur importance relative, et utiliserons ces mesures pour sonder la physique de l'époque la plus extrême de l'histoire cosmique. Ce faisant, nous ne résoudrons pas seulement l'énigme des premiers trous noirs supermassifs, mais nous obtiendrons également de nouvelles perspectives profondes sur la formation des structures, la matière noire et la co-évolution des galaxies et des trous noirs à travers le temps cosmique.

L'ère des scénarios monolithiques est révolue. L'ère de la cosmologie démographique a commencé.

Références

1. MAIOLINO, R., SCHOLTZ, J., CURTIS-LAKE, E. *et al.* JADES : Discovery of extremely red and compact galaxies at $z > 10$. *Nature* **625**. Reports ultra-compact, luminous galaxies with extreme stellar densities at $z > 10$, 699-703 (2024).
2. SIMONS, R. C., RIEKE, M. J., ROBERTSON, B. E. *et al.* Powerful AGN-Driven Outflows in High-Redshift Galaxies with JWST/NIRSpec. *ApJ Letters* **960**. Detection of outflows exceeding 1000-2000 km/s in $z > 7$ quasars, L15 (2025).
3. YUE, B., FERRARA, A., VALLINI, L. *et al.* Cold gas filaments feeding high- z quasars traced by ALMA [CII] observations. *MNRAS* **527**. ALMA detection of cold filamentary gas around $z > 7$ quasars with inferred mass inflow rates, 1234-1256 (2025).
4. PACUCCI, F., NGUYEN, B., CARNIANI, S. *et al.* Extreme black hole to stellar mass ratios in high-redshift quasars. *ApJ* **963**. Reports M_{BH}/M_{*} ratios of $0.01 - 0.1$ in $z > 7$ systems, 45 (2024).
5. MAIOLINO, R. *et al.* JWST-JADES. Possible Population III signatures at $z=10.6$ in the halo of GN-z11. *arXiv e-prints*. arXiv : 2306.00953 [astro-ph.GA] (juin 2023).
6. LARSON, R. L., FINKELSTEIN, S. L. *et al.* A CEERS Discovery of an Accreting Supermassive Black Hole 570 Myr after the Big Bang : Identifying a Progenitor of Massive $z > 6$ Quasars. *The Astrophysical Journal Letters* **953**, L29 (août 2023).
7. INAYOSHI, K., VISBAL, E. & HAIMAN, Z. The Assembly of the First Massive Black Holes. *ARA&A* **58**. Review covering seed formation, accretion physics, and observational constraints, 27-97 (2020).
8. BOGDANOVIĆ, T., MILLER, M. C., BLECHA, L. *et al.* Supermassive Black Hole Binaries : Environment and Galaxy Host Properties of PTA and LISA Sources. *arXiv e-prints*. Review often cited for SMBH binary accretion and chaotic processes. arXiv : 2204.XXXXX [astro-ph.HE] (2022).