

**Zeitschrift:** Orion : Zeitschrift der Schweizerischen Astronomischen Gesellschaft  
**Herausgeber:** Schweizerische Astronomische Gesellschaft  
**Band:** 44 (1986)  
**Heft:** 213

**Artikel:** Mouvements stellaires et évolution dynamique des galaxies  
**Autor:** Martinet, L.  
**DOI:** <https://doi.org/10.5169/seals-899139>

### **Nutzungsbedingungen**

Die ETH-Bibliothek ist die Anbieterin der digitalisierten Zeitschriften. Sie besitzt keine Urheberrechte an den Zeitschriften und ist nicht verantwortlich für deren Inhalte. Die Rechte liegen in der Regel bei den Herausgebern beziehungsweise den externen Rechteinhabern. [Siehe Rechtliche Hinweise.](#)

### **Conditions d'utilisation**

L'ETH Library est le fournisseur des revues numérisées. Elle ne détient aucun droit d'auteur sur les revues et n'est pas responsable de leur contenu. En règle générale, les droits sont détenus par les éditeurs ou les détenteurs de droits externes. [Voir Informations légales.](#)

### **Terms of use**

The ETH Library is the provider of the digitised journals. It does not own any copyrights to the journals and is not responsible for their content. The rights usually lie with the publishers or the external rights holders. [See Legal notice.](#)

**Download PDF:** 02.02.2025

**ETH-Bibliothek Zürich, E-Periodica, <https://www.e-periodica.ch>**

# Mouvements stellaires et évolution dynamique des galaxies

L. MARTINET

## 1. L'Univers et ses constituants

La structure et la manière qui constitue l'Univers est fortement hiérarchisé. A l'échelle macroscopique, qui nous intéresse ici, les étoiles sont les plus petits objets. Le Soleil, étoile parmi d'autres, a un diamètre de 700 000 kilomètres et une masse de  $2.10^{30}$  kilos. Les galaxies, vastes agglomérats d'étoiles, dont les plus étendues contiennent quelques centaines de milliards d'objets, ont des dimensions variables (de quelques milliers à quelques centaines de milliers d'années-lumière). Ces galaxies sont le plus souvent groupées en amas de galaxies, qui à leur tour, ne sont pas répartis de manière homogène dans l'espace mais forment des super-amas. L'extension de ces super-structures, les plus grandes connues actuellement, est de l'ordre de quelques centaines de millions d'années-lumière. Le super-amas «local» (notre Galaxie y est contenue!) est composé d'une dizaine de milliers de galaxies réparties en groupes et en amas. Les galaxies les plus lointaines connues à ce jour sont à une distance de quelques milliards d'années-lumière. A cette échelle, l'Univers semble être un grand vide ponctué de super-amas de galaxies. Autant dire que le Soleil, la Lune, les planètes du système solaire, y compris la Terre, objets de notre quotidien humain, font figure de petits débris négligeables dans cette immensité.

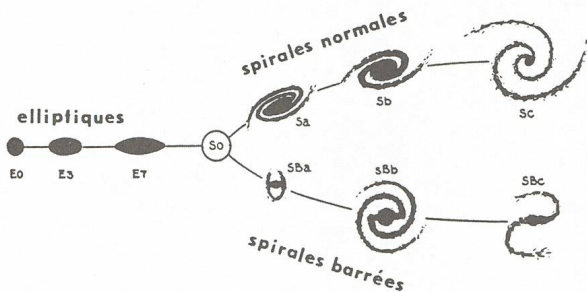


Fig. 1: Schéma des différents types de galaxies normales. Les traits de liaison n'impliquent pas nécessairement un processus évolutif d'un type à l'autre.

Un des objectifs primordiaux de l'astronomie contemporaine est d'expliquer la formation et l'évolution globale de l'Univers. L'étude de la structure et de l'évolution dynamique et chimique des galaxies peut apporter des informations essentielles à propos de l'histoire de l'Univers dans son ensemble. Quels sont, par exemple, les processus dominants qui ont conduit à la diversité des formes des galaxies observées, schématisées dans la figure 1? Un scénario cohérent de la formation et de l'évolution des galaxies devraient également permettre d'expliquer, entre autres faits d'observation:

1. pourquoi la matière des galaxies elliptiques qui montrent des aplatissements variés tourne si lentement (quelques dizaines de kilomètres par seconde autour du centre) alors que les parties centrales des galaxies spirales ont un mouve-

ment de rotation de cent à deux cents kilomètres par seconde.

- la rotation élevée (de l'ordre de deux cents kilomètres par seconde) des régions extérieures des galaxies spirales.
- les trop grandes vitesses relatives (plus de mille kilomètres par seconde) des galaxies dans les amas par rapport aux premières estimations des masses impliquées.
- la formation et la persistance de structures spirales et barrées dans certaines galaxies.
- les variations temporelles et spatiales d'abondance d'éléments chimiques lourds tels que l'oxygène, le sodium ou le fer dans la matière stellaire et interstellaire, notamment leurs décroissance du centre au bord des galaxies.

Ce bref énoncé suffit à montrer qu'une approche globale de l'évolution des galaxies fait appel à des domaines théoriques et observationnels aussi variés que l'évolution des étoiles, dont dépend l'enrichissement progressif du gaz interstellaire en éléments lourds – fabriqués dans les étoiles par nucléosynthèse –, la spectroscopie, qui permet de retrouver la trace des éléments chimiques contenus dans les atmosphères stellaires, la mécanique des corps en mouvement, l'hydrodynamique dont les équations dictent le comportement du gaz interstellaire, la mesure des couleurs et des luminosités des étoiles et des galaxies et l'observation de leurs mouvements spatiaux.

## 2. La dynamique stellaire et galactique

L'évolution des galaxies, des amas d'étoiles et des amas de galaxies est régie en grande partie par des mécanismes relevant de la dynamique stellaire: il s'agit alors d'étudier les mouvements internes qui résultent du champ de force créé par la distribution des masses dans ces systèmes. Il est par exemple important de savoir en premier lieu si les galaxies observées ont une sorte de cohésion interne qui leur assure un état d'équilibre durable. S'il en est ainsi, ces systèmes doivent pouvoir être décrits par des relations mathématiques entre la distribution de leurs mouvements et le champ de force qu'elles créent collectivement en chaque point. Les modèles théoriques basés sur ces relations doivent être testés à l'aide d'un certain nombre de contraintes observationnelles. Le traitement analytique de ce problème est très difficile: les équations à résoudre (de type intégral-différentiel) sont complexes même dans le cas apparemment simple de systèmes sphériques. Le problème se complique encore, lorsque, ayant trouvé une solution d'équilibre, on cherche à savoir si cet équilibre est stable, c'est-à-dire si le système reste constamment dans un état voisin de son état initial lorsqu'il est soumis à un effet perturbateur quelconque interne ou externe: le grand âge des galaxies réelles (quelques dizaines de milliards d'années) semble en effet impliquer en général de leur part une grande résistance à des perturbations. Vu les difficultés liées à la résolution purement théorique de ces problèmes, les astronomes sont contraints de réaliser des expériences numériques sur ordinateur pour se faire une idée globale de l'évolution temporelle des galaxies.

Une première approche consiste à calculer numériquement des orbites d'étoiles individuelles en mouvement dans un champ de force donné (dont les propriétés sont suggérées par la distribution des luminosités, donc des masses, observées dans une galaxie). Cette démarche permet de se faire une première idée des types de mouvements possibles dans tel ou tel système. On peut alors, dans un second temps, étudier la manière dont une population d'étoiles réagit dynamiquement au champ de force imposé. C'est dans ce cadre que s'inscrivent certaines des recherches entreprises récemment à l'Observatoire de Genève. Enfin, dans la mesure où l'on a accès à de gros ordinateurs, on peut simuler l'évolution collective de milliards de particules matérielles dans le but de mieux comprendre les effets dynamiques responsables de la morphologie observée des galaxies.

### 3. Trajectoires stellaires dans les galaxies

Le mouvement des étoiles dans les galaxies est dicté par la loi de la gravitation universelle et les lois du mouvement de Newton. On sait que ces lois suffisent pour donner en général une bonne description du mouvement des planètes autour du Soleil. Dans le cas du système solaire, le Soleil a une masse beaucoup plus importante que toutes les planètes réunies de sorte que le mouvement de chaque planète est dominé par l'attraction du Soleil tandis que l'attraction des autres planètes est négligeable en première approximation. (A ce propos, on soulignera toutefois que malgré le calcul des perturbations qui permet d'évaluer les corrections à apporter aux ellipses képlériennes du fait de la présence d'autres planètes, les prédictions à long terme sur le comportement global des trajectoires s'avèrent fort délicates au point qu'on ne peut actuellement rien affirmer à propos de la stabilité du système solaire). La situation des galaxies est fondamentalement différente: il n'y a pas de super-étoile qui domine le champ de gravitation. La masse totale est répartie entre des centaines de milliards d'étoiles. L'attraction des plus proches voisins est négligeable vis-à-vis de l'effet collectif dont la résultante est une attraction vers les régions centrales de plus grande densité. En

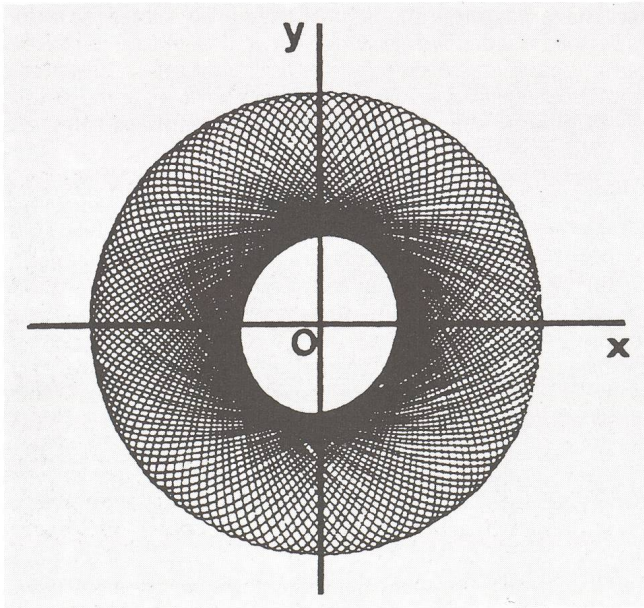


Fig. 2: *Orbite régulière d'une étoile dans le disque d'une galaxie spirale vue de face.*

examinant de plus près les galaxies spirales, on constate que la matière stellaire est distribuée d'une part dans un halo quasi sphérique et d'autre part dans un disque, plongé dans le halo, où l'on distingue une structure spirale et souvent une barre dans les régions centrales. La complexité de cette structure suggère que les orbites d'étoiles doivent être beaucoup plus compliquées que les belles ellipses qui constituent une bonne approximation des orbites planétaires dans le système solaire sur des temps pas trop longs.

Considérons un disque réel dans lequel les bras spiraux ou une barre ont une masse sinon nulle, du moins négligeable par rapport à la masse totale de la galaxie. Le comportement des orbites diffère très peu d'un mouvement caractérisé par deux périodes distinctes: une période de rotation du centre et une période d'oscillation radiale. Les deux périodes sont en général incommensurables (dans le cas contraire l'orbite résultante est périodique). Un tel mouvement est illustré dans la figure 2. Il est peut-être qualifié de régulier. Mais il existe des cas où une barre ellipsoïdale allongée (dont les axes principaux sont dans un rapport supérieur à 3) a pu se développer jusqu'à représenter au moins 10% de la masse totale de la galaxie. Les étoiles du disque vont ainsi subir une force perturbatrice quasi-périodique non négligeable induite par la barre, qui va engendrer un comportement orbital parfois nettement différent de celui que l'on vient de décrire. Pour certaines, le comportement est encore pratiquement régulier (Fig. 3). En parti-

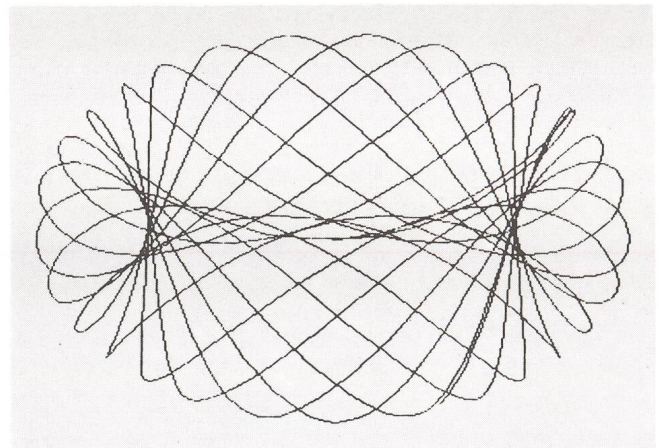


Fig. 3: *Orbite régulière dans la région centrale d'une galaxie barrée décrite en un milliard d'années. La barre est horizontale et ses dimensions sont du même ordre que l'extension de l'orbite.*

culier hors de la région de la barre, on a un grand nombre d'orbites quasi-circulaires. D'autres orbites deviennent irrégulières, à savoir qu'elles envahissent de manière désordonnée des régions étendues, comme le montre la figure 4. Leur comportement à long terme est quasi imprévisible. Elles ne renforcent pas la barre dans la mesure où la région qu'elles «couvrent» n'est pas en accord avec la morphologie de la barre (non indiquée sur la figure, mais que l'on peut se représenter allongée horizontalement avec un rapport d'axes égal à 5, dans la région centrale). Ce comportement désordonné peut affecter une certaine fraction de la population stellaire des régions internes des galaxies si bien qu'une sorte de chaos s'installe progressivement quand la barre devient plus massive. Ces calculs permettent d'expliquer pourquoi des barres massives allongées ne peuvent exister dans les galaxies et fournissent des éléments d'information sur la genèse de ces systèmes.

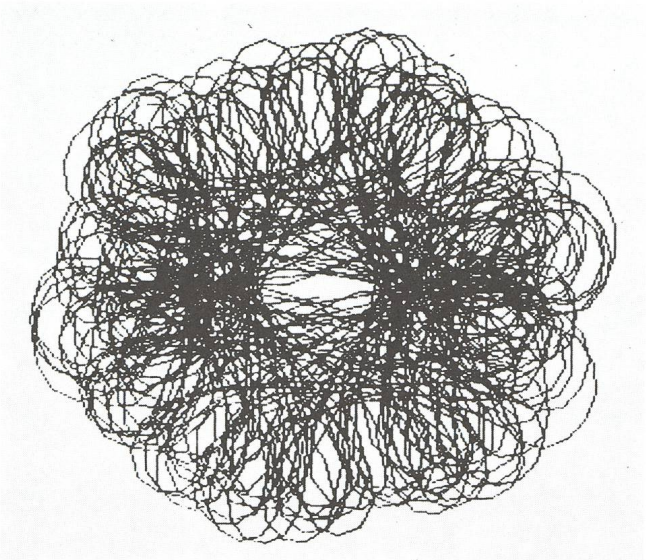


Fig. 4: *Orbite irrégulière dans le disque d'une galaxie barrée décrite en 5 milliards d'années.*

Les mouvements désordonnés, chaotiques, favorisant la migration de certaines étoiles des régions centrales et leur évacuation hors de la galaxie n'est pas à exclure. Le phénomène remet en cause la cohésion interne d'un système stellaire.

Notons en passant que cette évolution de l'ordre au chaos peut se manifester sous certaines conditions dans tous les problèmes où l'on est amené à étudier la dépendance du comportement d'un système à l'égard de paramètres variables ou de perturbations quelconques: de la météorologie à l'économétrie en passant par les diverses physiques, la génétique des populations, la chimie etc., les méthodes communes d'analyse numérique témoignent du caractère interdisciplinaire de l'étude des systèmes dynamiques et démontrent une fois de plus que la recherche fondamentale dans un domaine relativement abstrait peut avoir à long terme des prolongements à priori insoupçonnés dans des activités humaines plus quotidiennes.

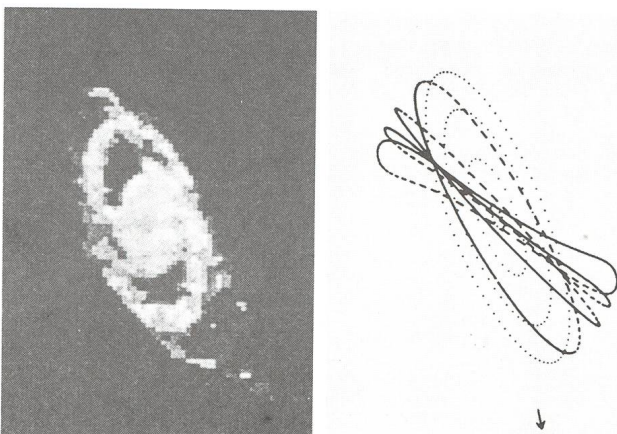


Fig. 5: *La distorsion observée dans la distribution d'hydrogène neutre dans les régions externes d'une galaxie spirale (à gauche) est à comparer avec la structure dessinée par un ensemble d'orbites périodiques dans un modèle de galaxies à trois axes inégaux (à droite).*

Appliqués à d'autres types de problèmes, les calculs d'orbites permettent d'expliquer par exemple quelles conditions doit remplir la distribution de matière dans certaines galaxies pour pouvoir tolérer de manière durable des distorsions du disque ou des ceintures de poussières interstellaires, non-alignées avec les axes de symétrie des systèmes concernés, qu'on observe fréquemment (Fig. 5).

#### 4. Les simulations des systèmes stellaires sur gros ordinateur

Le calcul des orbites individuelles dans un modèle de masse donné ne peut donner une réponse complète sur l'évolution dynamique des galaxies puisqu'il ne peut maîtriser le comportement collectif des étoiles. Si l'on veut avoir une idée plus précise des modifications de structure intervenant dans une galaxie, il faut recourir aux simulations sur gros ordinateur de systèmes de quelques centaines de milliards d'étoiles.

La possibilité de prendre en compte un nombre aussi grand de particules provient du fait que les forces de gravitation auxquelles est soumise chacune d'entre elles sont calculées seulement en un nombre restreint de points. On admettra que toutes les particules situées dans le voisinage immédiat de ce point sont assujetties à la même force. Hormis les contraintes de capacité de mémoire des ordinateurs, cette approximation est introduite par la nécessité d'achever le calcul dans des temps raisonnables. Pour s'assurer que l'approximation n'introduit pas de grosses erreurs et que par suite les résultats ne dépendent pas de manière importante du nombre total de particules, on réitère les expériences en modifiant soit le nombre de particules, soit le choix des points en lesquels sont calculés les forces. La méthode consiste à suivre au cours du temps les modifications des positions et des vitesses subies par les étoiles sous l'effet des forces de gravitation créées par la distribution de la matière dans le disque de la galaxie. On progresse par étapes, sur des intervalles de temps, suffisamment courts (de l'ordre du million d'années) par rapport à une période moyenne de révolution autour du centre du disque. Au cours de chaque étape, on calcule donc, à partir de la distribution des masses, le champ de force qui va régir le mouvement des étoiles. Les mouvements redistribuent alors la position des étoiles dans le disque. L'opération est réitérée à volonté. Assez rapidement (Fig. 6) des barres ou des ovales se développent, ce qui n'est pas gênant en soi, vu l'existence d'un nombre non négligeable de galaxies barrées dans l'Univers. Mais les expériences numériques de ce type prévoient que tous les

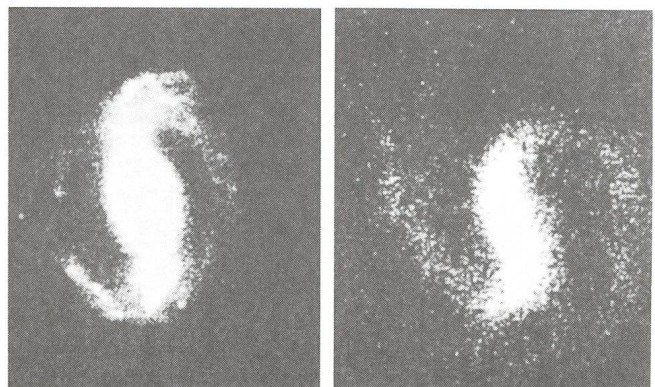


Fig. 6: *A gauche, une galaxie barrée photographiée dans le ciel sud. A droite, résultat d'une simulation sur ordinateur, après un temps de calcul correspondant à une évolution de 1 milliard d'années, une barre massive se forme.*

disques tendent à développer une telle structure et que la barre contient une grande partie de la masse totale. En outre, les disques deviennent plus «chauds» dans le sens que les mouvements aléatoires s'amplifient au point de présenter finalement un désaccord sérieux avec les mouvements présumés ou observés dans les disques des galaxies spirales.

En outre, on observe de nombreuses galaxies, dont la nôtre, dans lesquelles la plus grande fraction de la lumière provient d'un disque mince en rotation différentielle. Les mouvements aléatoires sont certainement faibles par rapport à la rotation systématique. Ces galaxies ne manifestent pas la tendance révélée par les expériences numériques sus-mentionnées, à savoir la formation d'une barre importante. Comment donc évitent-elles cette structure?

Sans résoudre tous les problèmes, il s'avère que l'introduction d'une composante sphéroïdale au moins aussi massive que le disque dans la simulation a pour effet de ralentir la formation d'une barre et d'en réduire l'importance.

Les considérations qui précèdent ont conduit à poser la question de l'existence de halos massifs dans les galaxies spirales mais aussi du contenu de ceux-ci. Comment les détecter, s'ils existent? Cette masse peut soit consister en de nombreuses étoiles de très faible masse, très peu lumineuses, de toute manière difficiles à repérer par l'observation, soit exister sous forme d'astres totalement obscurs, dont la mise en évidence ne pourrait être assurée que par des méthodes dynamiques. Ou s'agirait-il d'autres particules, révélées par la physique nucléaire? La question n'est pas clairement résolue à l'heure

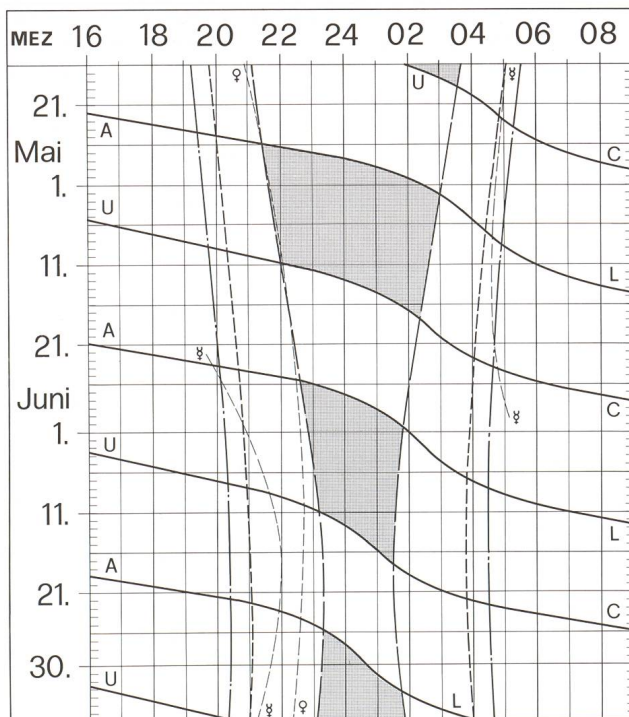
actuelle. Mais d'autres évidences observationnelles constituent de fortes présomptions en faveur de la réalité d'une masse «cachée» dans l'Univers et cela à tout degré de la hiérarchie des objets cosmiques. Notamment, si les amas de galaxies sont effectivement dans un état d'équilibre, il faut s'attendre à ce que les vitesses relatives des galaxies dans l'amas qui, agissant seules, auraient pour effet de les disperser dans l'espace, soient exactement balancées par les forces de gravitation, qui, elles, ont tendance à retenir ensemble ces galaxies. Si les vitesses étaient trop faibles, l'amas s'effondrerait sous l'effet de la gravitation et si, au contraire, les vitesses étaient trop élevées, il en résulterait une expansion de l'amas qui serait dissout en quelques milliards d'années. Or, on observe des amas de galaxies dont l'âge des constituants est de l'ordre de dix milliards d'années. Par conséquent, ces amas doivent être en équilibre. En mesurant les vitesses radiales de galaxies individuelles à partir de leur spectre, on peut déduire quelle gravité et, par conséquent, quelle masse totale est nécessaire pour maintenir l'équilibre de l'amas. Les résultats sont surprenants. Dans un amas riche en galaxies, la masse totale paraît environ 10 fois plus grande que ce qu'on obtiendrait si on ajoutait les masses des galaxies individuelles déterminées par les procédés classiques. Le problème de la masse «cachée» est effectivement l'un des plus intrigants de l'astronomie d'aujourd'hui.

Adresse de l'auteur:

L. Martinet, Observatoire de Genève, CH-1290 Sauverny.

### Sonne, Mond und innere Planeten

### Soleil, Lune et planètes intérieures



Aus dieser Grafik können Auf- und Untergangszeiten von Sonne, Mond, Merkur und Venus abgelesen werden.

Die Daten am linken Rand gelten für die Zeiten vor Mitternacht. Auf derselben waagrechten Linie ist nach 00 Uhr der Beginn des nächsten Tages aufgezeichnet. Die Zeiten (MEZ) gelten für 47° nördl. Breite und 8°30' östl. Länge.

Bei Beginn der bürgerlichen Dämmerung am Abend sind erst die hellsten Sterne — bestenfalls bis etwa 2. Grösse — von blossem Auge sichtbar. Nur zwischen Ende und Beginn der astronomischen Dämmerung wird der Himmel von der Sonne nicht mehr aufgehellt.

Les heures du lever et du coucher du soleil, de la lune, de Mercure et de Vénus peuvent être lues directement du graphique.

Les dates indiquées au bord gauche sont valables pour les heures avant minuit. Sur la même ligne horizontale est indiqué, après minuit, le début du prochain jour. Les heures indiquées (HEC) sont valables pour 47° de latitude nord et 8°30' de longitude est.

Au début du crépuscule civil, le soir, les premières étoiles claires — dans le meilleur des cas jusqu'à la magnitude 2 — sont visibles à l'œil nu. C'est seulement entre le début et la fin du crépuscule astronomique que le ciel n'est plus éclairé par le soleil.

- — — — — Sonnenaufgang und Sonnenuntergang  
Lever et coucher du soleil
- - - - - Bürgerliche Dämmerung (Sonnenhöhe -6°)  
Crépuscule civil (hauteur du soleil -6°)
- — — — — Astronomische Dämmerung (Sonnenhöhe -18°)  
Crépuscule astronomique (hauteur du soleil -18°)
- A            L  
U            C  
Mondaufgang / Lever de la lune  
Monduntergang / Coucher de la lune
- Kein Mondschein, Himmel vollständig dunkel  
Pas de clair de lune, ciel totalement sombre