

A propos de l'enregistrement magnétique

par J.-C. PIVOT
Lycée Le Castel - 21000 Dijon

Le principe de l'enregistrement magnétique proposé par l'anglais Oberlin Smith et complété par le hollandais Wilhelm Hedicke en 1888 devait aboutir à la réalisation du *telegraphon* dix années plus tard par le danois Kaldenar Poulsen ; le succès des phonos à cylindre ou à disque et les problèmes d'ordre technique et technologique devaient retarder d'une quarantaine d'années la commercialisation de ce type d'appareil.

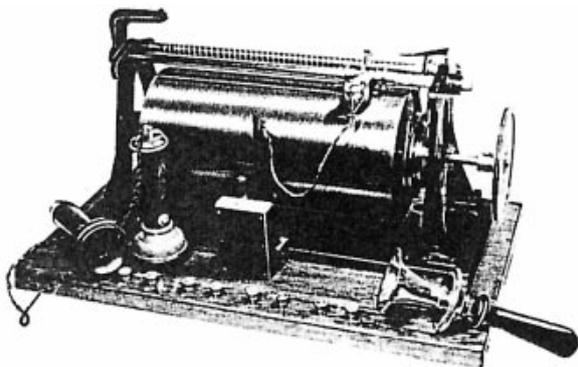


Figure 1 : Le télégraphone de W. Poulsen : un électroaimant alimenté par un micro parcourt un fil d'acier enroulé sur un cylindre et l'aimante donc de façon variable. L'aimantation rémanente engendre une tension induite aux bornes du même électroaimant lorsqu'il le parcourt à nouveau.

Très rapidement le cylindre sera remplacé par des bobines de fil ou de ruban d'acier puis de bande plastique recouverte d'oxyde de fer, la tête de lecture (l'électroaimant) restant fixe.

En 1938, la firme allemande AEG-Telefunken proposait le premier appareil d'enregistrement sonore sur bande magnétique sous le nom, tombé dans le domaine public, de magnétophone. Par la suite, la recherche de la miniaturisation ne s'opposera pas à l'amélioration de la qualité et le travail - souvent discret - des chimistes pour l'élaboration des bandes sera certainement déterminant.

1. LE PRINCIPE DU MAGNÉTOPHONE

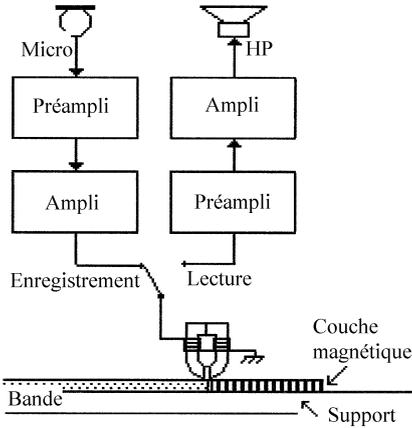


Figure 2

On aimante la bande en la soumettant à un champ magnétique. On utilise pour cela une tête d'enregistrement qui est un électroaimant en forme d'anneau. Les bobines sont parcourues par un courant modulé provenant du microphone après avoir été amplifié. L'aimantation est obtenue en faisant passer la bande devant l'entrefer dont la largeur est de quelques micromètres actuellement.

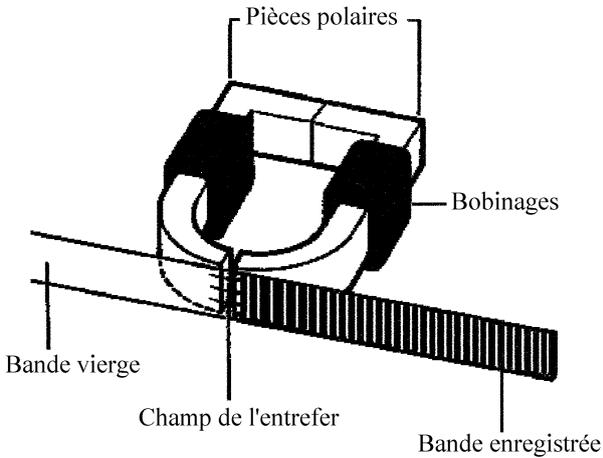


Figure 3

La couche magnétique conserve une aimantation rémanente, mais à cause du phénomène d'hystérésis, celle-ci n'est pas proportionnelle au courant, d'où une distorsion inacceptable. Très tôt (en 1927) les américains Carlson et Carpenter montrent qu'il suffit de superposer au signal à enregistrer un signal sinusoïdal à haute fréquence pour retrouver la linéarité impérative.

Aux circuits précédents on associe un oscillateur dont la fréquence propre varie de 40 kHz pour les enregistrements les plus médiocres à 120 kHz pour les plus performants. L'intensité de cette prémagnétisation dépend de la nature de la couche magnétique.

Cet oscillateur a la charge d'une autre fonction : celle d'effacer la bande avant l'enregistrement. Une aimantation continue de la bande par un aimant s'étant révélée plus délicate que prévue, on préfère enregistrer le signal ultrasonore de l'oscillateur précédent avec une intensité adaptée à la nature de la bande.

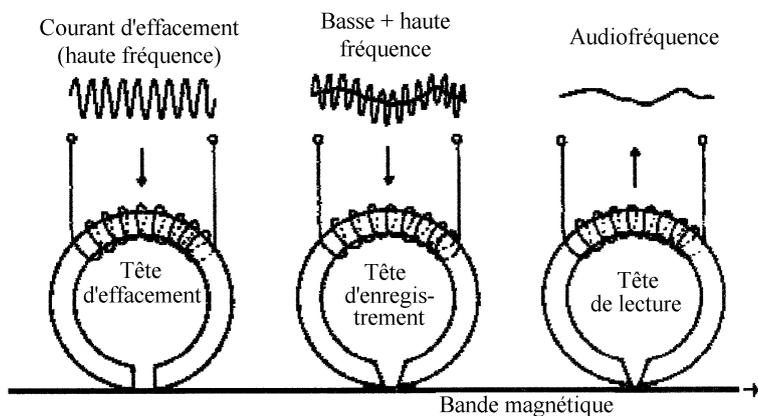


Figure 4 : Le système d'enregistrement sonore à trois têtes.

Les appareils professionnels ont toujours trois têtes :

- **Une tête d'effacement** avec un entrefer assez large (une centaine de micromètres) et un champ magnétique suffisant pour éliminer toute aimantation antérieure des bandes «métal» en particulier.
- **Une tête d'enregistrement** et **une tête de lecture** séparées pour deux raisons : d'une part le confort de l'opérateur qui entend quasi instantanément la qualité de son enregistrement ; d'autre part, l'entrefer de la

tête de lecture doit être le plus mince possible (de l'ordre du micromètre) pour restituer les fréquences les plus élevées du spectre tandis que celui de la tête d'enregistrement est assez large (une dizaine de micromètres) pour obtenir l'aimantation de la couche d'oxyde sur toute sa profondeur.

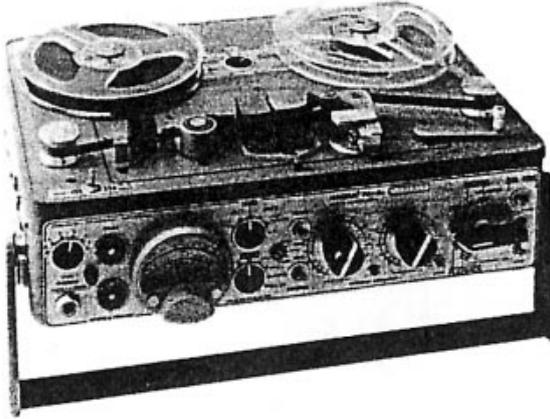


Figure 5 : Un magnétophone professionnel portable : le Nagra IV-S.

Les appareils à minicassette n'ont qu'une seule tête (avec double bobinage pour la stéréo) utilisée pour l'enregistrement et la lecture ; l'entrefer a donc une largeur intermédiaire de quelques micromètres, ce qui limite la restitution des fréquences aiguës.

Supposons un son de fréquence 15 000 Hz enregistré sur la bande d'une minicassette dont la vitesse de défilement standard est de 4,75 cm/s. Une période du signal occupe :

$$1/15\,000 \times 4,75 \cdot 10^{-2} = 3,2 \mu\text{m}$$

soit les dimensions de l'entrefer. En conséquence le courant induit est nul et la fréquence est passée à la trappe ; il ne restera alors que le bruit de fond de la bande, quelles que soient les manipulations électroniques du genre Dolby.

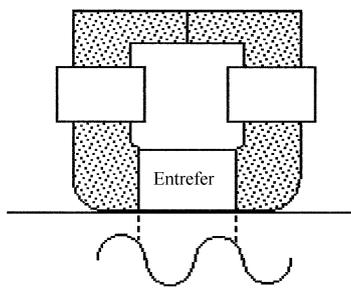


Figure 6 : L'entrefeer est trop large pour lire les variations d'aimantation symbolisées par la courbe.

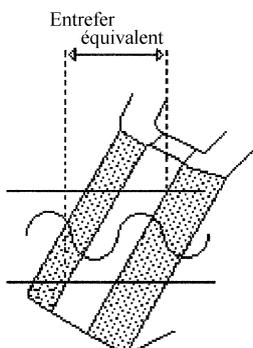


Figure 7 : Une erreur d'azimut entraîne une lecture moyenne sur une longueur supérieure à l'entrefeer lorsque la bande a été enregistrée sur un appareil bien réglé.

2. LA BANDE MAGNÉTIQUE

Une bande magnétique est composée de deux parties bien distinctes : le support et la couche magnétique.

Le support doit être assez souple pour épouser le mieux possible la forme des têtes afin de ne pas perdre trop d'aigus. Il doit être peu sensible à la chaleur et à l'humidité et surtout à la traction, c'est pourquoi les fabricants sont passés par l'acétate de cellulose, le polyvinyle puis le polyester pré-étiré.

La couche magnétique d'oxyde de fer Fe_2O_3 ou de dioxyde de chrome CrO_2 doit être la plus homogène possible ; les cristaux en

aiguilles de $0,3 \mu\text{m}$ de longueur sont soigneusement orientés dans le sens du défilement (par un champ magnétique) à la fabrication. La surface est éventuellement lissée pour ne pas entraîner une usure prématurée des têtes et pour réduire le bruit de fond de la bande. Enfin le liant qui fait adhérer la couche au support doit résister au temps.

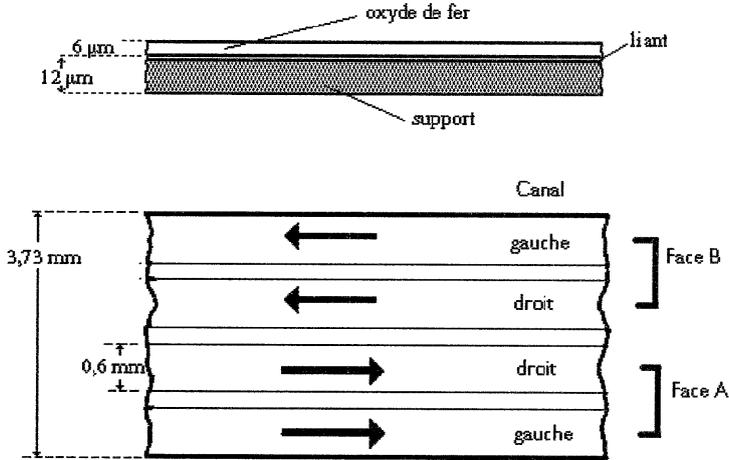


Figure 8 : La bande d'une minicassette C 60 vue en coupe et de face côté oxyde. Les épaisseurs relatives de la couche et du support sont à diviser par deux pour une C 120 (les appareils professionnels - à bobines ouvertes - utilisent une bande deux fois plus large et les pistes y sont entrelacées).

Remarque : Les bandes les plus fines (C 120) ont l'avantage de donner un meilleur contact avec la tête mais la faible épaisseur d'oxyde limite le niveau de l'enregistrement. Le mécanisme d'entraînement doit tenir compte de la plus grande fragilité de la bande notamment pendant les bobinages rapides.

3. LA PARTIE MÉCANIQUE

Aujourd'hui les volants d'inertie sont abandonnés et c'est l'axe du moteur qui joue le rôle de cabestan. La régulation de la vitesse est plus ou moins sophistiquée : régulation centrifuge par une masselotte solidaire du rotor, régulation électronique avec de nombreuses variantes (la dérive est appréciée par le terme *pleurage* des caractéristiques techniques).

La bande est appliquée sur le cabestan par un galet presseur en caoutchouc avec une «force» de un kilogramme pour le Nagra ! Elle est donc entraînée après son passage devant les têtes.

Elle doit maintenant être tendue. Pour cela la bobine débitrice s'oppose au mouvement imposé par le moteur :

- pour les appareils professionnels, un moteur auxiliaire exerce un couple constant opposé à la rotation (il servira au rembobinage rapide),
- pour les appareils à cassette, compte tenu des masses en mouvement, la friction de la bobine dans son boîtier suffit à tendre la bande.

Quelle que soit la solution, on peut remarquer que la tension augmente au cours de l'audition puisque le rayon de la bobine diminue régulièrement (elle passe de «30 g» à «70 g» pour le Revox A 77).

De même, du côté de la bobine réceptrice, il faut bobiner la bande, d'où un couple moteur obtenu soit par un deuxième moteur auxiliaire, soit par une ponction de l'énergie du moteur grâce à un jeu de courroies ou de galets. Ici la tension de la bande diminue régulièrement tandis que la vitesse de rotation de la bobine décroît.

Pendant la phase de rembobinage, la tension évolue peu (~ «200 g» pour le Révox) puisque le moment moteur et le moment résistant varient de façons opposées.

Enfin, compte tenu des largeurs des pistes enregistrées, on devine la précision du guidage transversal de la bande le long de son parcours sans que celui-ci n'engendre la moindre vibration, ce qui serait catastrophique (voir les termes *diaphonie* et *scintillement* des notices techniques).

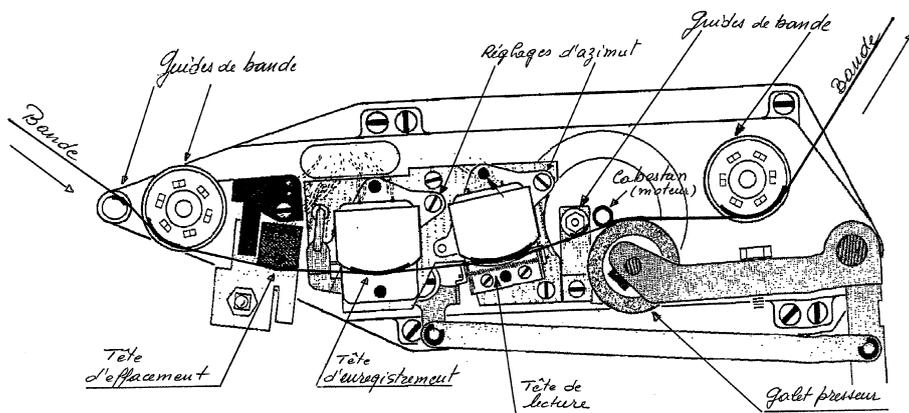


Figure 9 : La platine des têtes du Revox A77.

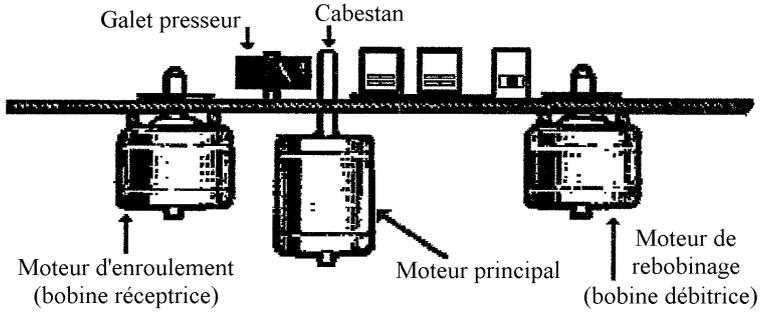


Figure 10 : Le mécanisme d'entraînement d'un magnétophone professionnel non portable.

L'étude du mouvement de toutes les pièces tournantes dans une minicassette peut être enrichissante en première S. Si tous les points périphériques ont la même vitesse linéaire, les vitesses angulaires sont toutes différentes : constantes ou variables avec le temps, suivant la pièce.

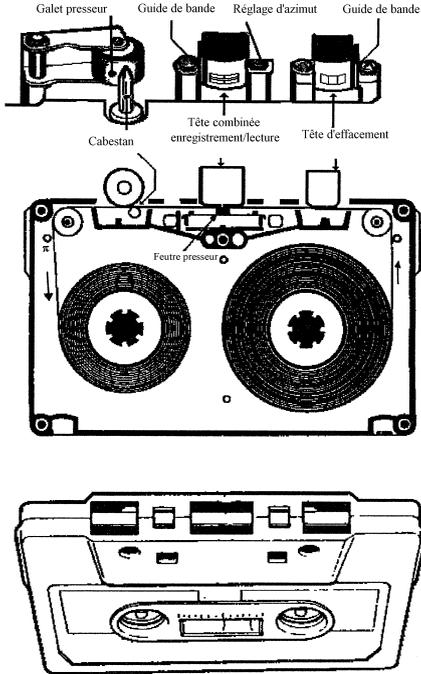


Figure 11 : Une minicassette ordinaire et la platine des têtes d'un appareil enregistreur.

4. LA PARTIE ÉLECTRONIQUE

L'obsession des ingénieurs est d'obtenir pour le couple enregistreur-lecteur la bande passante la plus plate et la plus vaste possible en limitant au maximum le bruit de fond de la bande et des amplificateurs. Les problèmes les plus importants apparaissent à partir de 1 000 Hz et chacun a entendu parler du système réducteur de bruit Dolby (B pour les amateurs). A l'enregistrement, les signaux de fréquence élevée mais de faible intensité sont relevés (de 10 dB) pour être ensuite réduits de la même valeur à la reproduction en utilisant le processus inverse : le résultat est la réduction du souffle résiduel des bandes.

Remarque : Lorsqu'on écoute une bande enregistrée avec Dolby sur un lecteur dépourvu de cet équipement, le résultat est désagréable à cause des aigus exagérés. Dans la situation inverse, l'écoute est beaucoup trop sourde.

Ce bref exposé montre l'évolution de l'enregistrement magnétique analogique toujours apprécié par les professionnels, et ses limites pour l'amateur.

Depuis cinq ou six ans on peut trouver sur le marché des enregistrements au format D.A.T. (Digital Audio Tape). Le signal analogique initial est converti en bits comme l'indique la figure 12 ; l'opération inverse est réalisée à la lecture par un deuxième convertisseur.

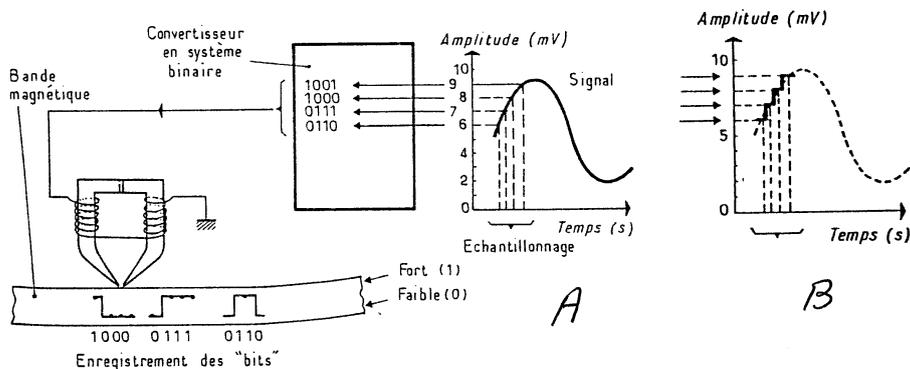


Figure 12 : Le principe de l'enregistrement numérique. En A le signal analogique initial, en B le signal reconstitué à la lecture (document Gendre).

Le bruit de fond de la bande n'intervient plus puisque l'enregistrement est une suite d'impulsions ; les copies sans pertes sont alors possibles à l'infini.

Le signal analogique est décrit par des paliers (à 16 bits) dont la «largeur» dépend de la fréquence d'échantillonnage. L'une d'elles, imposée, est celle des disques compacts soit 44,1 kHz (une sinusoïde de 4,41 kHz est décrite par dix paliers).

Ces valeurs imposent une vitesse de défilement élevée (3,133 m/s). Elle est obtenue comme pour les magnétoscopes par l'utilisation de têtes solidaires d'un tambour légèrement incliné (6°) et tournant à 2 000 tr/min.

Les pistes n'ont qu'une dizaine de micromètres de largeur et la bande ne défile finalement qu'à 8 mm/s.

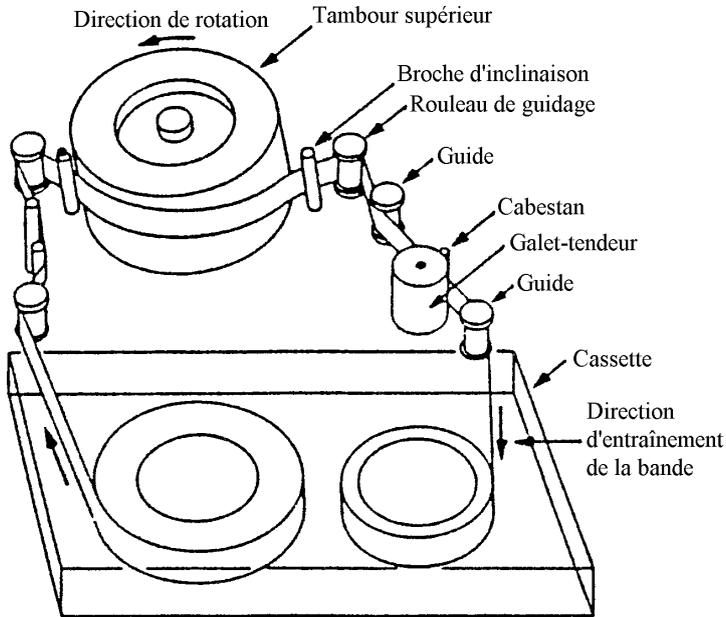


Figure 13 : Principe du défilement de la bande sur les appareils à cassette au format D.A.T. (document Kenwood).

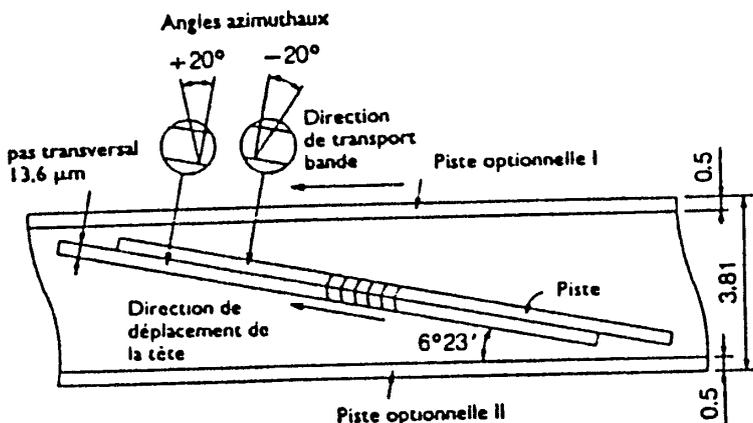


Figure 14 : Disposition des pistes sur la bande magnétique (document Kenwood).

La qualité de l'électronique (convertisseurs analogique / numérique, numérique / analogique, correcteur d'erreur, etc.) et de la mécanique en font des appareils encore très chers en dépit de leurs performances remarquables.

BIBLIOGRAPHIE

- Claude GENDRE : *Les magnétophones*, 1992, chez Eyrolles.
- Les articles du même auteur dans la revue Vidéo pratique.
- Enregistrement et reproduction du son, Encyclopédie Universalis.
- Les notices techniques du Révox A77, du Nakamichi BX-2 et du Nagra-D.

Annexe 1

Extrait des caractéristiques du magnétophone à bobines ouvertes Révox A 77

CARACTÉRISTIQUES TECHNIQUES

(Valeurs typiques mesurées avec bande Révox 601)

Principe d'entraînement

Mécanisme à trois moteurs, moteur de cabestan asservi électroniquement ; commutation électronique de la vitesse.

Vitesses de défilement

$$\left. \begin{array}{l} 19 \text{ cm/s } (7^{1/2} \text{ ips}) \\ 9,5 \text{ cm/s } (3^{3/4} \text{ ips}) \end{array} \right\} \pm 0,2 \%$$

Taux de pleurage pondéré

$\leq \pm 0,08 \%$ à 19 cm/s
 $\leq \pm 0,1 \%$ à 9,5 cm/s

Dérive

$\leq 0,2 \%$

Diamètre des bobines

Maximum 26,5 cm (10.5").

Position de fonctionnement

Horizontale ou verticale.

Amplificateurs

Équipés entièrement de transistors au silicium à structure planar.

Courbe de réponse enregistrement-lecture

$$\left. \begin{array}{l} 30 \text{ Hz} - 20 \text{ kHz } + 2/- 3 \text{ dB} \\ 50 \text{ Hz} - 15 \text{ kHz } \pm 1,5 \text{ dB} \end{array} \right\} \text{ à } 19 \text{ cm/s}$$

$$\left. \begin{array}{l} 30 \text{ Hz} - 16 \text{ kHz } + 2/- 3 \text{ dB} \\ 50 \text{ Hz} - 10 \text{ kHz } \pm 1,5 \text{ dB} \end{array} \right\} \text{ à } 9,5 \text{ cm/s}$$

Distorsion harmonique (niveau maximum à 1 kHz)

$\leq 2 \%$ à 19 cm/s
 $\leq 3 \%$ à 9,5 cm/s

Corrections

Enregistrement NAB, lecture commutable NAB ou IEC.

Rapport signal / bruit, pondéré selon ASA A, enregistrement-lecture

19 cm/s : ≥ 66 dB (4 pistes ≥ 62 dB)

9,5 cm/s : ≥ 63 dB (4 pistes ≥ 59 dB)

Recul de la diaphonie (à 1 kHz)

≥ 60 dB en mono

≥ 45 dB en stéréo

Fréquence de l'oscillateur

120 kHz, oscillateur push-pull.

Entrées par canal (microphone commutable LO/HI)

cinch et jack	Low : 50-600 Ω	0,15 mV
	High : jusqu'à 100 k Ω	2,5 mV
DIN cinq pôles	Radio : 33 k Ω	2,5 mV
cinch	AUX : 1 M Ω	35 mV

Sorties par canal

cinch	Output max. 2,5 V / Ri 600 Ω
DIN cinq pôles	Radio max. 1,2 V / Ri 2,5 k Ω
jack	Phones écouteurs 200-600 Ω

Annexe 2

Caractéristiques du magnétophone à cassette

Nakamichi BX2

SPÉCIFICATIONS TECHNIQUES

Pistes

Quatre pistes, deux canaux stéréo.

Têtes

Deux (enregistrement / reproduction, effacement).

Moteurs (transport)

Servo moteur CC (entraînement de cabestan) × 1.

Moteur CC (entraînement de bobine) × 1.

Alimentation

100, 120, 120/220-240, 220 ou 240 V CA ;

50/60 HZ (selon le pays de distribution).

Consommation

23 W maximum.

Vitesse de défilement

4,8 cm/s ± 0,5 %.

Pleurage de scintillement

Moins de 0,11 % WTD crête.

Moins de 0,06 % WTD efficace.

Réponse de fréquence

20 Hz à 20 000 Hz (niveau d'enregistrement : - 20 dB).

Rapport signal / bruit

Dolby NR de type C en service < 70 µs, bande ZX >

Supérieur à 68 dB (400 Hz, 3 % de DHT, HFI A-WTD efficace).

Dolby NR de type B en service < 70 µs, bande ZX >

Supérieur à 62 dB (400 Hz, 3 % de DHT, HFI A-WTD efficace).

Distorsion harmonique totale

Moins de 1,0 % (400 Hz, 0 dB, Bandes ZX et EX II).

Moins de 1,2 % (400 Hz, 0 dB, Bandes SX).

Effacement

Supérieur à 60 dB (100 Hz, 0 dB).

Séparation

Supérieure à 36 dB (1 kHz, 0 dB).

Diaphonie

Supérieure à 60 dB (1 kHz, 0 dB).

Fréquence de prémagnétisation

105 kHz.

Entrée de ligne

50 mV, 30 k Ω .

Sortie de ligne

0,5 V (400 Hz, 0 dB, potentiomètre de niveau de sortie maximum), 22 k Ω .

Casque d'écoute

2,2 mV (400 Hz, 0 dB, potentiomètre de niveau de sortie maximum), 8 Ω de charge.

Encombrement

430 (l) \times 110 (H) \times 250 (P) millimètres.

Poids approximatif

5,5 kg.

Annexe 3

Caractéristiques du Nagra-

Enregistreur portable à quatre canaux audio-numérique

FORMAT BANDE ET TRANSPORT

Système d'enregistrement

Tête rotative, trois pistes longitudinales.

Lecture

Écoute confidence.

Type de bande

6,35 mm bande numérique.

Vitesse de défilement

49,6 mm/s pour deux canaux.

99,2 mm/s pour quatre canaux.

Durée d'enregistrement

- *Bobine de 360 m :*
 - deux canaux = deux heures,
 - quatre canaux = une heure.
- *Bobine de 720 m :*
 - deux canaux = quatre heures,
 - quatre canaux = deux heures.

Vitesse variable

± 10 %.

Système de recherche

Par piste analogique longitudinale.

Temps de démarrage

< 2 s de la position «**ready**» à l'enregistrement effectif.

Temps de bobinage

~ 90 s (pour la bobine de 360 m).

PERFORMANCES AUDIO***Nombre de canaux***

Deux ou quatre.

Fréquences d'échantillonnage

32 kHz, 44,1 kHz et 48 kHz.

Entrées / sorties analogiques

18 bits.

Rapport signal sur bruit

> 98 dB.

Bande passante

20 Hz à 20 kHz \pm 0,5 dB (à 48 kHz de fréquence d'échantillonnage).

Distorsion harmonique totale

< 0,05 %.

Diaphonie entre canaux

> 80 dB.

Pleurage et scintillement

Non mesurable.

Entrées / sorties numériques

24 bits (AES).

Correction d'erreurs

Reed Solomon (38, 34, 5) (12, 9, 4).

Prix : \approx 100 000 F.