

COLLOQUE NATIONAL SUR LE TRAITEMENT DU SIGNAL ET SES APPLICATIONS

NICE du 16 au 21 JUIN 75



CORRECTION DES ERREURS POUR LA TELEVISION NUMERIQUE

par S. HARARI et A. RANQUET

CCETT, 2 rue de la Mabilais, 35000 RENNES.

RESUME

La transmission de signaux de télévision codés numériquement pose le délicat problème de leur susceptibilité aux erreurs. Pour bon nombre de voies numériques, elle nécessite la mise en œuvre de systèmes de codage destinés à se protéger contre les erreurs ou leurs effets, si l'on veut atteindre les niveaux de qualité recommandés par le C. C. I. R. Les contraintes particulières au problème (haut débit, redondance faible, travail en temps réel) ont poussé les auteurs à se limiter à une certaine classe de codes (codes en blocs); leurs performances sont étudiées sous plusieurs hypothèses de répartition d'erreurs. On examine en particulier une stratégie de décodage simple permettant de se prémunir contre les groupements d'erreurs engendrés par un transcodage "5B2H". A titre d'exemple l'implantation d'un système de codage susceptible d'être retenu est détaillée

SUMMARY

Transmission of digitally coded television signal implies the problem of its sensitivity to errors. To be able to reach the quality levels recommended by the C. C. I. R. one must implement error protection systems for many of the existing digital channels. The constraints relative to this problem (high transmission rate, low redundancy, real time operation) have lead us to concentrate on algebraic block codes. Their performances are studied under various error pattern assumptions. We examine a simple decoding strategy which is successful in the case of error patterns generated by "5B2H" transcoding. As an example we give the implementation of a possible coding system

CORRECTION DES ERREURS POUR LA TELEVISION NUMERIQUE

1) La télévision numérique.

Depuis un certain nombre d'années la tendance générale est à la numérisation des systèmes de télécommunication. La télévision n'a pas échappé à cette règle et actuellement un grand nombre de groupes à travers le monde se penchent sur ce problème. Parmi les raisons qui font l'intérêt de cette technique en télévision, on peut citer premièrement ses bonnes performances sur les communications par satellite, deuxièmement son meilleur comportement que celui des modulations analogiques sur les voies comprenant un grand nombre de sections de régénération. Enfin la télévision numérique se fondera mieux dans un environnement qui devient de plus en plus numérique.

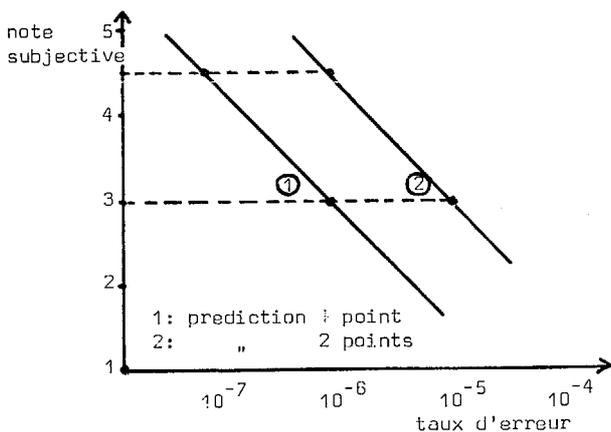


Fig.1: Correspondance qualite taux d'erreur pour une image MICD.

Un examen rapide du problème montre qu'un codage se bornant à un échantillonnage et une numérisation du signal de télévision conduit à des débits supérieurs à la centaine de mégabits par seconde. Ces débits sont prohibitifs. On est donc amené à utiliser des systèmes de réduction de redondance permettant de gagner un facteur d'au moins deux. Cependant ce traitement entraîne une augmentation de la vulnérabilité du signal aux erreurs de transmission. Or il semble naturel d'exiger de tout système de télévision qu'il satisfasse aux avis du C. C. I. R. relatifs à la qualité subjective de l'image fournie.

Ces recommandations conduisent à exiger les notes 4, 5 et 3 sur l'échelle à 5 notes du C. C. I. R. : (4, 5: limite de perceptibilité du défaut;

3: défaut légèrement gênant) pendant au moins respectivement 99 et 99, 9% du temps. En se reportant

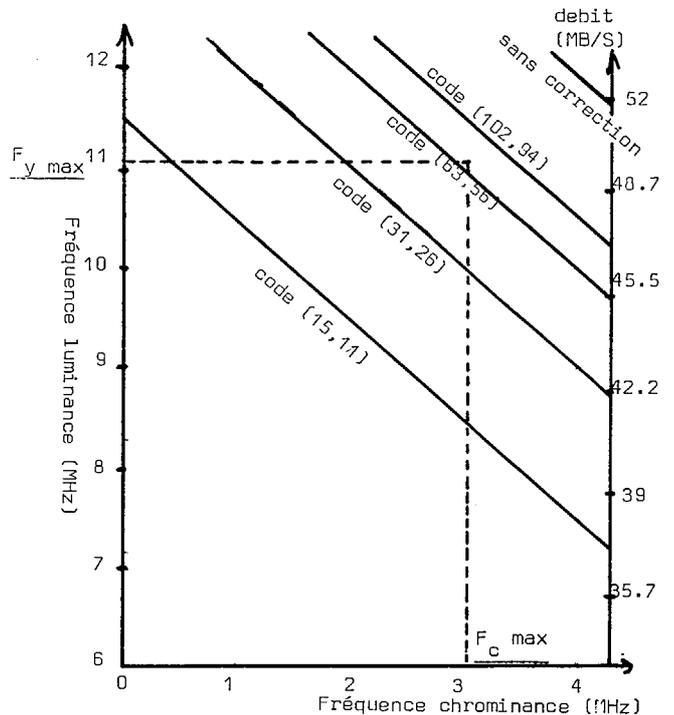


Fig 2: Débit nécessaire en fonction de Fy et Fc et domaines d'application de certains codes.

à la figure 1 (1) on peut constater que cela implique des taux d'erreur inférieurs à $6 \cdot 10^{-8}$ et à $7 \cdot 10^{-7}$ pour un codage MIC Différentiel (M. I. C. D) avec prédiction à 1 point et à $7 \cdot 10^{-7}$ et à $7,7 \cdot 10^{-6}$ pour une prédiction à 2 points. Malheureusement certaines des artères de transmission qu'utilisera la télévision numérique présentent des taux d'erreur bien supérieurs à ceux-ci (de l'ordre de 10^{-4}). Dans ces cas là on sera obligé d'utiliser des systèmes de correction d'erreur qui font l'objet de cette communication.

2) Choix du système de correction d'erreur:

L'étude qui nous concerne a été conduite dans le cadre d'expériences de transmission de télévision numérique sur des artères à 52 Mb/S.

Le système de codage employé est basé sur la technique de codage MIC Différentiel des composantes séparées du signal de télévision couleur (luminance et différences couleurs).

(1): Les résultats proviennent de tests sur la qualité subjective d'images de visiophone. Ils ont été adaptés au cas de la télévision en prenant comme hypothèse que la quantité significative est le nombre d'erreurs par seconde.



CORRECTION DES ERREURS POUR LA TELEVISION NUMERIQUE

Le système choisi devra satisfaire aux conditions suivantes:

- 1) Le système doit pouvoir fonctionner en temps réel.
- 2) La redondance introduite ne doit pas excéder 10%. En effet on peut voir en se référant à la figure 2 que les valeurs maximales des fréquences d'échantillonnage de luminance et chrominance que l'on s'autorise conduisent à un débit de 46 Mégabit/S. L'artère utilisée ayant un débit de 52 Mb/S on peut tolérer environ 10% de redondance. Bien entendu pour des valeurs inférieures de ces fréquences la redondance permise sera plus grande, et l'on pourra utiliser un nombre plus important de codes.
- 3) Structure de la trame numérique. Il est naturel d'organiser les informations à transmettre en trames numériques. Cette trame numérique a la durée d'une ligne de télévision (64 µS); c'est à dire qu'elle comporte 3292 bits utiles. Comme d'autre part les données issues du codeur se présentent sous forme de mots de 4 bits, il est souhaitable que le nombre de blocs de correction d'erreur par trame soit divisible par 4.

n	t=1 a_1	t=2 a_1
54	$8 \cdot 10^{-4}$	$1.3 \cdot 10^{-6}$
102	$1.6 \cdot 10^{-3}$	$5 \cdot 10^{-6}$
122	$2 \cdot 10^{-3}$	$8 \cdot 10^{-6}$
127	$2.2 \cdot 10^{-3}$	$9 \cdot 10^{-6}$
138	$2.3 \cdot 10^{-3}$	$1 \cdot 10^{-5}$

Fig. 4: Performances des codes de longueur n corrigeant une ou deux erreurs.

Taux d'erreur en ligne: 10^{-4}

a_1 : taux d'erreur sur les lignes de télévision.

Pour atteindre l'efficacité recherchée, les codes convolutionnels devraient avoir une redondance supérieure à 10%. D'autre part les bons algorithmes de décodage de ces codes ne sont pas adaptés au travail en temps réel. Nous nous sommes donc orientés vers les codes en bloc, évidemment algébriques. La contrainte de structure de trame numérique oblige à utiliser des longueurs de bloc n inférieures à 823. Sur la figure 3 nous avons laissé en blanc les zones correspondant aux valeurs de n compatibles avec les différentes contraintes énoncées et ceci pour des codes corrigeant $t = 1, 2, 3, \dots, 10$ erreurs.

Les bornes inférieures sont imposées par la contrainte de redondance. La borne supérieure pour $t = 1$ est dictée par l'efficacité de correction, calculée dans l'hypothèse d'erreurs aléatoires.

3) Répartitions des erreurs et stratégies adaptées.

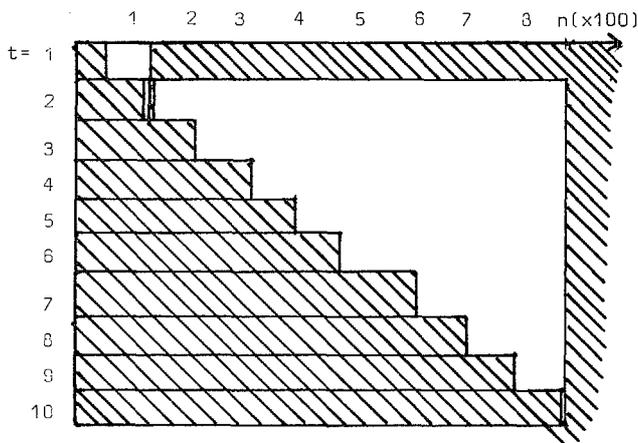


Fig.3: Longueurs n de codes admissibles corrigeant t erreurs.

Erreurs aléatoires.

Observons en détail l'influence des erreurs se présentant sous une répartition aléatoire. Dans un système de télévision numérique utilisant un codage MICO la qualité de l'image est fonction du nombre de lignes accidentées par seconde. Dans le cas d'une répartition d'erreur aléatoire on peut calculer aisément ce nombre à partir du taux d'erreur en ligne τ :

- taux d'erreur sur les lignes sans correction:
 $\tau_1 = 1 - (1 - \tau)^N$
 avec N = nombre de bits par lignes,



- taux d'erreur sur les lignes avec correction:

$$\tau'_l = 1 - (1 - \tau_b)^{2b} \approx b\tau_b$$

où b est le nombre de blocs par ligne et τ_b est le taux d'erreur sur les blocs.

D'autre part

$$\tau_b = 1 - (1 - \tau)^n - n\tau(1 - \tau)^{n-1} \approx n(n-1) \frac{\tau^2}{2}$$

si l'on corrige 1 erreur par bloc, et

$$\tau_b = 1 - (1 - \tau)^n - n\tau(1 - \tau)^{n-1} - \frac{n(n-1)}{2} \tau^2$$

$$\tau^2(1 - \tau)^{n-2} \approx n(n-1)(n-2) \frac{\tau^3}{6}$$

si l'on corrige 2 erreurs par bloc.

Ces formules avec les valeurs numériques

$\tau = 10^{-4}$, $N = 3000$, $b = \frac{N}{n}$ conduisent aux résultats de la figure 4.

Erreurs très corrélées.

La plupart des voies numériques peuvent se classer en 2 catégories: celles qui sont peu sensibles au bruit erratique continu et celles pour lesquelles les erreurs qui lui sont imputables sont prédominantes.

Pour les premières, parmi lesquelles on peut citer les câbles, le taux d'erreur est très faible et les perturbations se présentent sous forme de très longs paquets d'erreur. Dans ce cas, la faible fréquence de ces accidents rend superflu un codage correcteur d'erreur qui de toute façon serait inefficace.

Dans la deuxième catégorie, on trouve des voies comme les faisceaux hertziens ou les liaisons par satellite qui présentent des erreurs soit parfaitement aléatoires, soit très fortement corrélées. En effet, les perturbations arrivent aléatoirement et se traduisent par un groupement d'erreurs plus ou moins important selon le type de modulation sur le train numérique. Par exemple, dans la modulation de phase, les bits sont groupés par k si l'on a 2^k phases; une erreur de phase affecte donc un ou plusieurs bits parmi k . Si en outre il s'agit de démodulation différentielle, un groupe de k bits erronés est toujours suivi d'un autre groupe erroné. Pour 4 phases on a donc des erreurs fortement corrélées sur 4 bits, et pour 8 phases sur 6 bits. Pour se prémunir contre ces groupements d'erreurs on a le choix entre augmenter la capacité de correction des codes correcteurs d'erreur, et utiliser l'entrelacement. Vu la faible longueur des paquets d'erreurs c'est cette dernière technique qui est la plus intéressante. Quand le cardinal de l'alphabet de modulation n'est pas une puissance de 2, on est amené à utiliser un

transcodage qui lui aussi provoque une forte corrélation des erreurs. Mais dans ce cas, on peut essayer de tirer parti de la redondance qu'il introduit pour mettre en oeuvre des stratégies de correction mieux adaptées à cette corrélation.

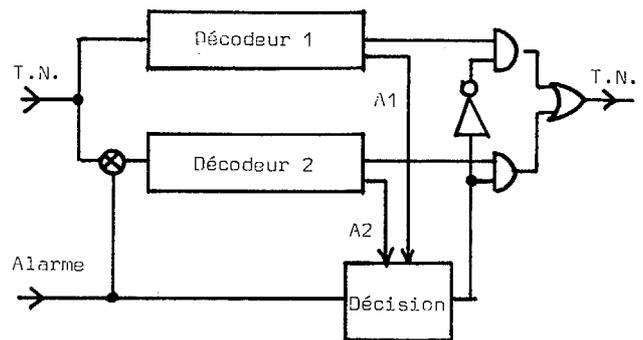


Fig 5: Système de correction adapté au transcodage "5B2H".

Par exemple on peut penser à utiliser un transcodage "5B2H" (5 bits \rightarrow 2 éléments à 6 niveaux). On peut le choisir de sorte qu'une erreur en ligne se traduise soit par une seule erreur non détectée, soit 1 ou 2 erreurs groupées sur 3 bits, dont on connaît la position grâce à une alarme. Dans ce cas, cette information nous permet d'utiliser, pour nous prémunir contre ces accidents isolés, une technique de correction d'effacement alliée à un correcteur d'une seule erreur, ce qui nous dispense d'avoir recours soit à l'entrelacement soit à des codes corrigeant plusieurs erreurs.

La figure 5 montre l'organisation d'un tel système. Le cœur du système est constitué par 2 décodeurs identiques corrigeant une erreur et en détectant 2. En l'absence d'alarme, le décodeur 1 est actif. Quand survient une alarme celle-ci inverse les bits douteux sur le train alimentant le décodeur 2. Un des deux décodeurs reçoit alors un train contenant une seule erreur, l'autre un train en contenant 2. Les alarmes à la sortie permettent de choisir le décodeur qui a fonctionné correctement.

4) Tableau des codes acceptables.

Toutes ces considérations semblent montrer qu'en général on peut employer des codes corrigeant une seule erreur par bloc, en utilisant quand cela est nécessaire un entrelacement d'ordre faible.



CORRECTION DES ERREURS POUR LA TELEVISION NUMERIQUE

Comme d'autre part les équipements électroniques nécessaires à la mise en œuvre de codes corrigeant plus d'une erreur par bloc sont nettement plus complexes que ceux correspondant à 1 erreur, on a tout intérêt à se limiter aux codes corrigeant une seule erreur quand cela est possible. C'est pourquoi nous nous sommes plus particulièrement intéressés à la première ligne de la figure 3, qui, une fois détaillée, et compte non tenu des codes ne répondant pas aux hypothèses de travail, conduit à la figure 6.

n	n-k	n ₁	n ₂	n ₃	red.	n.l.f.
63	6	52	2808	37	10.4%	
81	7	40	2960	69	10.5	19
82	7	"	3000	"	9.3	"
*	8	"	2960	29	10.5	"
99	"	32	2944	125	11	22
100	"	"	2976	"	10	"
*	8	"	2944	93	11	"
101	7	"	3008	125	9	"
*	8	"	2976	93	10	"
102	7	"	3040	125	8	24
*	8	"	3008	93	9	"
113	7	28	2968	153	10.2	25
114	"	"	2996	"	9.4	"
*	8	"	2968	123	10.2	"
117	7	"	3080	153	6.9	28
*	8	"	3052	125	7.7	"
131	8	24	2952	157	10.7	29
132	"	"	2976	"	"	"
*	9	"	2952	133	10.7	"
137	8	"	3096	157	6.4	32
*	9	"	3072	133	7.1	"

Fig. 6: Tableau des codes corrigeant une erreur admissibles.

On trouvera sur cette figure, en regard de la longueur n de bloc, le nombre de bits de redondance (n - k), le nombre n₁ de blocs par trame numérique, la redondance totale, le nombre n₂ de bits utiles protégés par trame, le nombre n₃ de bits par trame utilisables à d'autres fins que la transmission de la luminance et de la chrominance, et enfin le nombre de lignes fausses par seconde dans l'hypothèse d'un taux d'erreur en ligne de 10⁻⁴. Les codes marqués d'un astérisque corrigent une erreur et en détectent deux par bloc.

Tous les codes cités sont acceptables. Il faut cependant bien noter que:

- les codes de longueurs supérieures à 127 demandent sensiblement plus de matériel que ceux de longueur inférieure à 127.

- dans un groupe de codes de performances semblables, on a tout intérêt à choisir celui qui a la plus faible longueur.
- les codes n = 81, 82 et n de 99 à 102 présentent l'avantage supplémentaire de pouvoir être entrelacés à l'ordre 8, ce qui peut être intéressant sur certaines voies numériques (par exemple Multiphase différentiel 8 phases).
- la transmission des sons accompagnant un programme de télévision demande un débit non négligeable, dont il n'a pas été tenu compte jusqu'à présent. En particulier on peut compter 28 bits par voie son "haute qualité" et 4 bits par voie "son commentaire" par trame numérique.

5) Système réalisé.

Compte tenu de toutes ces remarques, nous avons choisi un code de Hamming raccourci (102, 94) pour nos expériences préliminaires. Ce code peut être entrelacé à l'ordre 8, détecte 2 erreurs et permet la transmission d'un nombre intéressant de sons d'accompagnement. De plus en se rapportant à l'article de SLOANE paru en 1972 dans "DISCRETE MATHEMATICS", on peut remarquer que pour les longueurs de 96 à 127, c'est le code de Hamming raccourci qui est le meilleur et que ceci n'est pas vrai pour les longueurs 81, 82 et 113 à 118. La figure 9 détaille la réalisation du codeur et du décodeur réalisés. Les performances que l'on peut attendre de ce système sont indiquées sur la figure 7 et la figure 8.

Log τ	N ₀	N ₁	N ₂
-3	13000	2000	74
-4	3700	23	11/12s
-5	400	11/5s	11/3h
-6	40	11/8'	
-7	4	11/13h	
-8	11/2s		

Fig. 7: Performances du code H(102,94).

τ : taux d'erreur en ligne.

N₀: nombre de lignes fausses par seconde en l'absence de correction.

N₁: nombre de lignes non corrigées par seconde.

N₂: " " " " " et non détectées.

Conclusion:

Il peut sembler absurde d'augmenter le débit à transmettre par les bits de correction que nécessite justement l'emploi de réduction de redondance. En fait, comme cette réduction est d'un rapport au moins deux, et que les codes correcteur d'erreur envisagés ont un rendement important, le gain net de l'opération est intéressant. Il faut noter que les systèmes vers lesquels on s'orientera sont particulièrement simples, et que leur emploi n'alourdit pas considérablement les équipements à réaliser.

Enfin il ne faut pas oublier que les débits de systèmes de codage de télévision vont avoir tendance à diminuer. Cette tendance est favorable à la correction des erreurs qui pourra utiliser une redondance de plus en plus grande, mais jusqu'à un certain point seulement; ceci pour deux raisons: augmentation de la sensibilité aux erreurs.

possibilité d'utiliser des voies numériques de débit plus faible. Dans ce cas, l'ensemble du problème sera à reconsidérer.

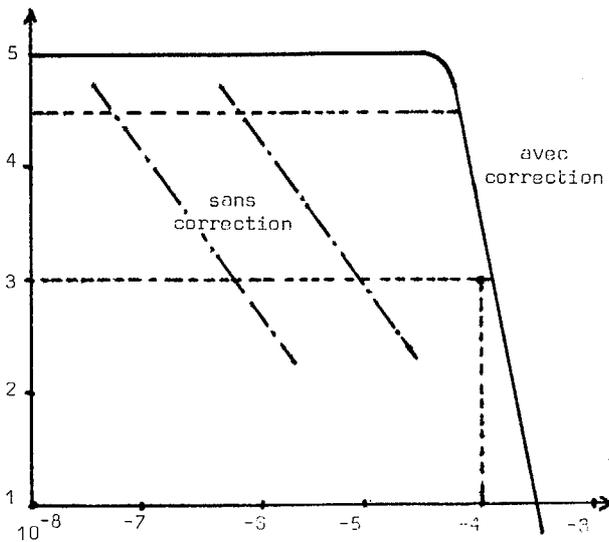
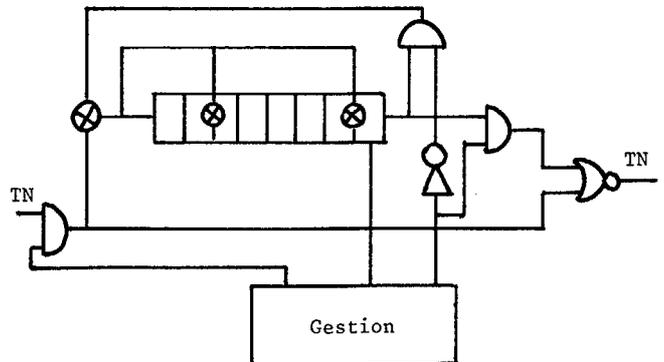
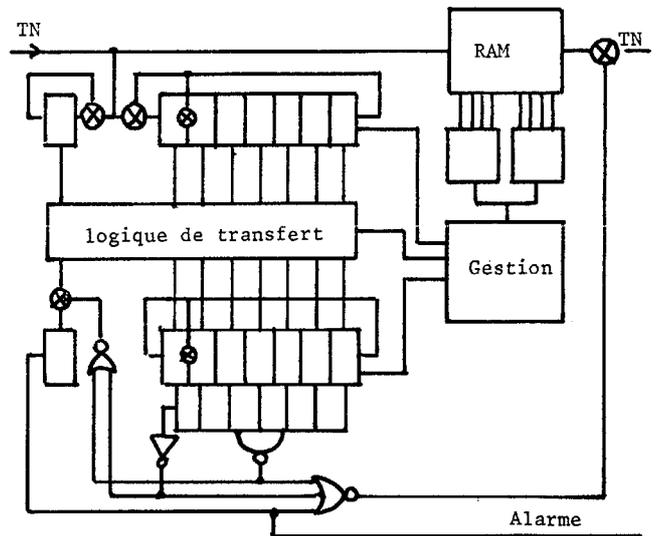


Fig 8: Amélioration apportée par le code correcteur $ll(102,94)$.

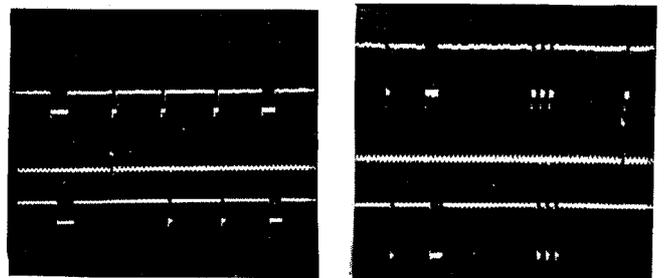


Codeur. Polynôme générateur: $x^8+x^7+x^2+1$



Décodeur.

Fig. 9: Réalisation des codeur et décodeur expérimentaux.



Photographies illustrant le fonctionnement du système.

- Trace haute: trains erronés
- " médiane: positions des erreurs
- " basse: trains corrigés.